

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE  
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À  
L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

COMME EXIGENCE PARTIELLE  
À L'OBTENTION DE LA  
MAITRISE EN GÉNIE MÉCANIQUE  
M. Ing.

PAR  
MOHAMED DRIRA

DÉVELOPPEMENT D'UN APPAREIL DE CARACTÉRISATION D'ÉLÉMENTS DE  
CONNECTEURS ÉLECTRIQUES BOULONNÉS

MONTREAL, LE 06 janvier 2004

© Droits réservés de Mohamed Drira

CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ  
PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

Mme Françoise Marchand, professeure, présidente de jury  
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

M. Vladimir Brailovski, professeur, directeur de mémoire  
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

M. Patrick Terriault, professeur, co-directeur de mémoire  
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

M. Victor Songmene, professeur, membre de jury  
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

IL A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC

LE 11 décembre 2003

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

# **DÉVELOPPEMENT D'UN APPAREIL DE CARACTÉRISATION D'ÉLÉMENTS DE CONNECTEURS ÉLECTRIQUES BOULONNÉS**

Mohamed Drira

## **SOMMAIRE**

Le présent travail porte sur l'identification des grades (ou classes) de la boulonnerie utilisée dans les postes de distribution d'Hydro-Québec. Afin d'assurer une identification rapide des grades des boulons, les normes nationales et internationales (SAE, ASTM, ISO, BS, NF, DIN, JIS, etc.) préconisent différentes sortes de marquages. La diversité de ces normes ainsi que l'absence complète de marquage en cas de tiges filetées (qui sont souvent utilisées pour remplacer les boulons) créent des difficultés dans les postes lorsqu'il s'agit de faire un bon choix, essentiellement pour les éléments de fixation en acier de grades 2 et 5. Cette situation engendre des frais très importants pour les opérations d'inspection et de remplacement d'un élément de fixation, en plus des inconvénients dus à la mise hors service des lignes de distribution.

Notre mandat consistait à analyser la situation actuelle dans les postes de distribution d'Hydro-Québec et à fournir une solution technique au problème d'identification de grades des éléments de fixation. Suite à cette analyse, nous avons proposé d'utiliser la mesure de dureté comme technique rapide et non destructive d'identification. Les valeurs de la résistance à la rupture pour la boulonnerie de grades 2 et 5 sont respectivement 75 et 120kpsi. Ainsi, les expériences qui ont été réalisées sur des boulons normalisées ont démontré que un essai de dureté peut remplacer un essai de traction pour le cas de notre application.

La conception, la fabrication et le calibrage d'un appareil permettant la réalisation de la mesure de dureté de type Brinell pour l'identification des grades de la boulonnerie ont été réalisées dans le cadre de ce projet. Cet appareil est doté d'un système de levier pour l'application de la charge sur une bille de diamètre 3,175mm et d'un limiteur de force capable de reproduire la charge maximale de 300kgf avec une bonne répétabilité (écart-type de 3,18kgf). L'utilisation de cet appareil, qui ne contient aucune composante électronique, ne nécessite aucune qualification technique spéciale, ce qui représente un critère principal de la conception.

Finalement, une série d'essais de validation effectués sur des boulons normalisés, a démontré que l'identification des grades à l'aide de l'appareil développé donne des résultats fiables. En effet, une simple visualisation de l'empreinte créée lors d'un essai de type Brinell, permet de faire la comparaison de la taille de celle-ci par rapport à un échantillon étalon fourni avec l'appareil et par conséquent, d'indiquer précisément le grade de l'élément de fixation.

# **DEVELOPMENT OF A DEVICE FOR THE CHARACTERIZATION OF ELECTRIC BOLTED CONNECTORS ELEMENTS**

Mohamed Drira

## **ABSTRACT**

This work concerns the identification of the grades (or class) of the nuts and bolts used in the distribution stations of Quebec-Hydro. The diversity of the national and international standards (SAE, ASTM, ISO, BS, NF, DIN, JIS, etc.) causes a problem because of the different kinds of marking. Moreover, the total absence of marking on the threaded rods, which are frequently used for the bolts replacement, complicates their proper selection, more specifically in the case of steel fasteners of grades 2 and 5. This situation causes significant expenses for the inspection and replacement of a fastener, in addition of the disadvantages due to the outage of the lines distribution.

Our mandate was to provide a technical solution to the problem of the bolt grade identification. Following the detailed analysis of the actual situation in the stations of Quebec-Hydro, the use of the hardness measurement was proposed as a fast and nondestructive identification technique. The values of the tensile strength for the bolts of grades 2 and 5 are respectively 75 and 120kpsi. Thus, the tests were carried out on standardized screws and the experimental results showed that measurement of hardness can replace the tensile tests in the case of our particular application.

The design, the manufacturing and the calibration of an apparatus allowing the use of the Brinell type hardness measurement for the identification of the grades of the fasteners were carried out within the framework of this project. This apparatus is equipped with a lever system for the application of the load on the ball (diameter 3,175mm) and with a force limiter able to reproduce the maximum load of 300kgf with an great repeatability (standard deviation of 3,18kgf). The apparatus does not contain electronic parts and does not require a specific technical qualification from the user, which represents a principal criteria of the design.

Finally, validation testing carried out on standardized bolts showed that the grade identification with the developed apparatus is feasible. Indeed, a simple visualization of the indentation created after a Brinell hardness test, enables to make the comparison of the size of this one with a sample standard provided with the apparatus, and consequently, indicates the grade of the fastener.

## REMERCIEMENTS

Le travail présenté dans ce mémoire a été effectué au sein du Laboratoire sur les Alliages à Mémoire et les Systèmes Intelligents (LAMSI) du département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure.

Je tiens tous d'abord à exprimer ma reconnaissance à mon directeur de recherche, le professeur Vladimir Brailovski, pour la qualité de son encadrement, son soutien que j'apprécie beaucoup, ses conseils et son appui moral avant et durant la période du projet.

J'aimerais aussi remercier mon co-directeur de recherche le professeur Patrick Terriault pour sa disponibilité et ses initiatives ciblées dans la réalisation de ce projet.

Je voudrais remercier Monsieur Yvon Turcotte de TransÉnergie (Hydro-Québec) pour sa collaboration et son appui technique grâce à sa vaste expérience.

Mes remerciements s'adressent également à tous ceux qui ont contribué à la réalisation de ce travail et particulièrement Matthieu Tanguy et tous les gens du LAMSI pour la sympathie qu'ils ont manifestée et pour leur collaboration.

Je ne dois pas oublier de remercier le professeur Christian Masson pour son encouragement. Aussi, Alexandre Vigneault et les techniciens du département de génie mécanique: Serge Plamondon et Jean-Guy Gagnon pour leur aide précieuse à la réussite de ce projet.

Je désire enfin dédier cet ouvrage à toute ma famille. Leur soutien, leurs encouragements et leur amour ont été une source de motivation à la réussite de mes études.

## TABLE DES MATIÈRES

	Page
SOMMAIRE.....	i
ABSTRACT.....	ii
REMERCIEMENTS.....	iii
TABLE DES MATIÈRES.....	iii
LISTE DES TABLEAUX.....	vi
LISTE DES FIGURES.....	vii
LISTE DES ABRÉVIATIONS ET SIGLES.....	x
INTRODUCTION.....	1
CHAPITRE 1 REVUE DE LA LITTÉRATURE.....	5
1.1 Introduction.....	5
1.2 Revue des normes et marquages.....	5
1.3 Théorie de la relation "dureté – résistance mécanique".....	8
1.3.1 La dureté Brinell.....	9
1.3.2 La dureté Meyer.....	10
1.3.3 Introduction à la théorie de la plasticité.....	13
1.3.4 Ecrouissage – Loi de consolidation.....	15
1.3.5 Relation entre la dureté Brinell et la résistance à la rupture.....	18
1.3.6 Approche de J. Datsko et al. (2001).....	20
1.4 Conclusion.....	24
CHAPITRE 2 MÉTHODOLOGIE DE L'IDENTIFICATION ET RÉSULTATS OBTENUS.....	25
2.1 Introduction.....	25
2.2 Essais effectués à l'IREQ ( Institut de Recherche d'Hydro-Québec ).....	26
2.3 Démarche suivie.....	26
2.4 Essais de dureté.....	27
2.4.1 Mesures sur les écrous.....	28
2.4.2 Mesures sur les vis et tiges filetées.....	29

2.5	Essais de traction.....	30
2.5.1	Montage des essais de traction.....	31
2.5.2	Résultats des essais .....	32
2.6	Validation des résultats .....	34
2.6.1	Comparaison des résultats.....	34
2.6.2	Validation avec différents lots de boulonnerie de TransÉnergie .....	37
2.6.3	Validation de la relation d'équivalence dureté et résistance.....	39
2.7	Conclusion .....	40

### CHAPITRE 3 CONCEPTION ET ÉTUDE DE L'APPAREIL DE L'IDENTIFICATION..... 41

3.1	Introduction.....	41
3.2	Choix des paramètres de conception.....	41
3.2.1	Vérification de la relation $F = aD^2$ (première approche).....	41
3.2.2	Influence du coefficient $a$ ( $F = aD^2$ ) (deuxième approche).....	47
3.2.3	Simulation de l'essai de dureté Brinell .....	48
3.2.4	Choix final de la force et du diamètre de la bille .....	50
3.3	Recherche d'idées de conception.....	51
3.3.1	Système d'application de la force par volant .....	51
3.3.2	Système de pince.....	52
3.3.3	Système d'application de la force par levier .....	54
3.4	Description de la solution retenue.....	55
3.5	Conception et modélisation du limiteur de force .....	56
3.5.1	Conception du limiteur de force.....	56
3.5.2	Modélisation : approche du problème.....	57
3.5.3	Démarche et hypothèses de modélisation .....	58
3.5.4	Modélisation sous MATLAB.....	69
3.5.5	Calcul de la vis de réglage de la compression des ressorts .....	72
3.6	Analyse par éléments finis .....	76
3.6.1	Déformation de la semelle .....	76
3.6.2	Diagramme des forces et réactions agissant sur l'appareil .....	77
3.6.3	Modélisation avec ANSYS .....	78
3.6.4	Modélisation avec PRO/MECHANICA .....	80
3.7	Conclusion .....	82

### CHAPITRE 4 ANALYSE ET OPTIMISATION DE LA LECTURE DES RÉSULTATS..... 83

4.1	Introduction.....	83
4.2	Lecture des empreintes.....	83
4.2.1	Pouvoir de détection des empreintes à l'œil nu .....	83
4.2.2	Sondages et résultats obtenus.....	85
4.2.3	Utilisation du comparateur optique.....	88

4.3	Essais et étude d'autres formes de pénétrateurs .....	89
4.4	Conclusion .....	93
CHAPITRE 5 CALIBRAGE ET EXPERIMENTATION .....		94
5.1	Fabrication et montage de l'appareil.....	94
5.2	Résultats des essais de calibrage de l'appareil .....	95
5.3	Correspondance des résultats des essais avec la modélisation.....	96
5.4	Sources et calcul des erreurs .....	98
5.4.1	Erreurs systématiques.....	99
5.4.2	Erreurs aléatoires.....	102
5.4.3	Effet de l'ensemble des erreurs .....	103
5.5	Expérimentation et essais de validation du prototype par le client.....	104
5.6	Fiabilité de l'appareil conçu.....	105
5.7	Conclusion .....	106
CONCLUSIONS.....		108
RECOMMANDATIONS.....		109
ANNEXES:		
1	Marquages des grades selon les normes ASTM, ISO et SAE.....	110
2	Développement limité de la relation (1.14).....	118
3	Résultats des essais de dureté (Rockwell) sur les vis et Écrous.....	120
4	Programmes Matlab, Ressort.m & Final.m.....	123
5	D.C.L du système levier.....	135
6	Programme Ansys .....	138
7	Feuille de sondage.....	141
8	Dessins de fabrication .....	143
BIBLIOGRAPHIE .....		144



## LISTE DES TABLEAUX

	Pages
Tableau I	Caractéristiques mécaniques des boulons selon SAE J429 .....6
Tableau II	Caractéristiques mécaniques des boulons selon ISO 898 .....6
Tableau III	Équivalence entre les grades et classes des boulons .....7
Tableau IV	Valeurs de coefficients d'écrouissage de quelques matériaux .....17
Tableau V	Résultats des essais de traction – qualité ordinaire .....32
Tableau VI	Résultats des essais de traction – qualité supérieure .....33
Tableau VII	Comparaison des valeurs de la résistance – qualité ordinaire .....36
Tableau VIII	Comparaison des valeurs de la résistance – qualité supérieure .....37
Tableau IX	Résultats des mesures de dureté des boulons de TransÉnergie .....38
Tableau X	Calcul de la relation dureté vs résistance – qualité ordinaire .....39
Tableau XI	Calcul de la relation dureté vs résistance – qualité supérieure .....39
Tableau XII	Valeurs moyennes de Rm/HB entre les deux lots boulons .....40
Tableau XIII	Calculs de vérification de la relation $F = a.D^2$ .....44
Tableau XIV	Résultats des essais avec charge de 300 kg .....49
Tableau XV	Caractéristiques techniques des ressorts .....72
Tableau XVI	Échantillons utilisés durant le sondage .....87
Tableau XVII	Calcul de la valeur de dureté H pour les grades 2 et 5 .....92

## LISTE DES FIGURES

	Pages
Figure 1 Lots de boulons normalisés .....	1
Figure 2 Poste de transformation de Boucherville (735 - 315 kV) .....	2
Figure 3 Lot de vis recueillies d'un magasin de TransÉnergie .....	4
Figure 4 Marquage sur les écrous selon la norme SAE J995 .....	7
Figure 5 Exemples de marquage sur les têtes des vis selon ISO 898 .....	8
Figure 6 Essai Brinell .....	10
Figure 7 Vues de coupe des empreintes obtenues par indentation sphérique .....	11
Figure 8 Indentations géométriques similaires ( $d/D$ constant) .....	13
Figure 9 Représentation de la loi d'écrouissage « Puissance » .....	16
Figure 10 Représentation de la courbe contrainte réelle-déformation réelle .....	16
Figure 11 Linéarisation et définition du coefficient d'écrouissage .....	17
Figure 12 Droite linéarisée obtenue par J. Datsko .....	21
Figure 13 Graphe des points obtenus par J. Datsko et al (2001) pour 3 métaux .....	23
Figure 14 Détails d'un boulon (vis & écrou) normalisé a tête hexagonale .....	27
Figure 15 Appareil de dureté Rockwell - Macromet marque BUEHLER .....	28
Figure 16 Mesure de la dureté sur un écrou sur l'appareil ROCKWELL .....	29
Figure 17 Emplacement des mesures pour les écrous d'après ASTM F606 .....	29
Figure 18 Mesure de la dureté sur une vis sur l'appareil ROCKWELL .....	30
Figure 19 Emplacement des mesures pour les vis selon ASTM F606 .....	30
Figure 20 Montage de l'essai de traction selon la norme ASTM F606 .....	31
Figure 21 Montage de l'essai de traction sur MTS 810 .....	32
Figure 22 Courbes des essais de traction – boulons de qualité ordinaire .....	33
Figure 23 Courbes des essais de traction – boulons de qualité supérieure .....	33
Figure 24 Comparaison des mesures de dureté – écrous de qualité ordinaire .....	34
Figure 25 Comparaison des mesures de dureté - écrous de qualité supérieure .....	35

Figure 26 Comparaison des mesures de dureté – qualité ordinaire .....	35
Figure 27 Comparaison des mesures de dureté – qualité supérieure .....	36
Figure 28 Graphique de la relation $F=30D^2$ (Norme ASTM – E10).....	42
Figure 29 Vérification de la relation $F = 30D^2$ .....	44
Figure 30 Vérification de la relation $F = 5D^2$ .....	45
Figure 31 Variation de l'intervalle delta en fonction du diamètre de la bille D .....	46
Figure 32 Écart des diamètres des empreintes entre grade 2 et 8 en fonction de D.....	47
Figure 33 Influence du coefficient "a" sur l'identification des empreintes .....	48
Figure 34 Montage utilisé pour la simulation de l'essai de dureté Brinell .....	49
Figure 35 Delta_d (Gr.2 & Gr.5) versus le diamètre D, $F=300$ kgf.....	50
Figure 36 Première idée de conception, système de volant/vis .....	51
Figure 37 Système de pince .....	53
Figure 38 Proposition de prototype final .....	54
Figure 39 Système : limiteur de force (version finale) .....	55
Figure 40 Réduction de diamètre du limiteur .....	57
Figure 41 Position initiale de la bille .....	59
Figure 42 Position du dernier point de contact avec la rainure en V .....	61
Figure 43 Modélisation du réglage du ressort horizontal.....	64
Figure 44 Position de sortie de la rainure en V .....	65
Figure 45 Calcul de la déflexion du ressort 2 .....	67
Figure 46 Position de la bille en bout de course .....	68
Figure 47 Charge appliquée vs position de la bille.....	70
Figure 48 Bilan des forces sur le cône de réglage.....	73
Figure 49 Déformation de la semelle lors d'un essai de dureté .....	76
Figure 50 Forces et réactions agissant sur le système du levier.....	77
Figure 51 Variation de $F_2$ , $R_x$ et $R_y$ en fonction de l'angle $\alpha$ .....	78
Figure 52 Résultats de la simulation de la semelle telle que conçue .....	79
Figure 53 Résultats des simulations avec différents épaisseurs.....	80
Figure 54 Condition aux frontières appliquées sur le modèle .....	81

Figure 55 Résultats obtenus avec Pro/Mechanica, épaisseur :19 mm .....	81
Figure 56 Principe de visualisation de l'œil humain.....	84
Figure 57 Quelques exemples de comparateurs optiques .....	89
Figure 58 Quelques exemples de marquages sur lentilles .....	89
Figure 59 Essai de dureté réalisé avec un pénétrateur sphérique.....	90
Figure 60 Essai de dureté réalisé avec un pénétrateur conique.....	92
Figure 61 Variation de Delta_d (Gr.5 & Gr.2) en fonction de l'angle du cône.....	93
Figure 62 Montage des deux éléments de l'appareil.....	94
Figure 63 Montage utilisé pour le calibrage de l'appareil .....	95
Figure 64 Courbes de modélisation & des essais.....	97
Figure 65 Valeurs des pics de la force des essais de répétabilité.....	98
Figure 66 Erreurs systématiques et aléatoires par rapport à la valeur réelle.....	99
Figure 67 Empreinte créée suite aux essais .....	101
Figure 68 Variation des courbes suite aux essais.....	101
Figure 69 Essais de validation de l'appareil après calibrage .....	104

## LISTE DES ABRÉVIATIONS ET SIGLES

d	Diamètre de l'empreinte, mm
D	Diamètre de la bille, mm
F	Force appliquée sur le matériau, N
S	Surface de la calotte sphérique (Brinell), mm <sup>2</sup>
HB	Dureté Brinell, sans dimension
HM	Dureté Meyer, sans dimension
k	Coefficient de la loi de Meyer, N/mm <sup>m</sup>
m	Indice de la loi de Meyer, sans dimension
K <sub>d</sub>	Constante utilisé dans la relation de Tabor, sans dimension
E	Module de Young, MPa
$\nu$	Coefficient de poisson, sans unité
$\sigma$	Contrainte, MPa
$\sigma_{moy}$	Contrainte moyenne, MPa
$\sigma_{max}$	Contrainte maximale, MPa
$\bar{\sigma}$	Contrainte équivalente de Von Mises, MPa
$\sigma_1$	Contrainte d'écoulement pour une déformation égale à 1, MPa
$\varepsilon$	Déformation, sans dimension
$\bar{\varepsilon}$	Déformation équivalente de Von Mises, sans dimension
e	Base des logarithmes népériens
n	Indice d'écrouissage, sans dimension
R <sub>m</sub>	Résistance à la rupture, MPa
R <sub>p</sub>	Limite d'élasticité, MPa
C	Constante utilisée dans la relation dureté vs résistance

$a$	Constante utilisée dans les calculs de vérification de la relation $F=aD^2$
$C_i$	Force de contact au point $i$ , N
$k_i$	Rigidité du ressort $i$ , N/mm
$L0_i$	Longueur libre du ressort $i$ , mm
$T_i$	Compression du ressort $i$ , N
$f$	Coefficient de frottement, sans dimension
$\Delta x_{initial}$	Déflexion initiale des ressorts horizontaux, mm
$\Delta y_{initial}$	Déflexion initiale des ressorts verticaux, mm
$j$	Jeu existant entre le bâti et plateau mobile du limiteur de force, mm
$T_{j_{initial}}$	Compression initiale du ressort $j$ , N
$T_{j_{contact}}$	Compression du ressort $j$ au dernier point de contact, N
$T_{j_{max}}$	Compression maximale du ressort $j$ , N
Reglage_x	Réglage en x de la précharge des ressorts horizontaux par le cône, mm
Reglage_y	Réglage en hauteur du cône, mm
$\alpha$	Angle de la rainure en V, °
$\beta$	Demi-angle au sommet du cône, °
$\Delta_1$	Déflexion du ressort horizontale au dernier point de contact, mm
$\Delta_2$	Déflexion du ressort horizontale une fois la bille sortie de la rainure, mm
$\Delta_y$	Déformation équivalente de Von Mises, mm
$\Delta_{total\_i}$	Déflexion totale du ressort $i$ , mm
$l$	Largeur de la rainure en V, mm
$p$	Profondeur de la rainure, mm
$R$	Rayon de la bille utilisé dans le limiteur de force, mm
$n$	Ratio de compression des ressorts au dernier point de contact, sans dimension
$u$	Ratio de compression des ressorts au point initial, sans dimension
$a$	Distance entre le point de contact de la bille et la paroi du plateau, mm

$\phi$	Angle de frottement, °
$\Delta l$	Déflexion totale du ressort, mm
F	Composante tangentielle de la force R, N
N	Composante normale de la force R, N
R	Force de contact due à la compression du ressort sur le cône, N
Q	Force résultante s'appliquant sur la vis de réglage, N
$F_{B \max}$	Effort maximal que peut subir un boulon, N
$R_{e \min}$	Limite d'élasticité minimale, MPa
$A_s$	Section résistante de la tige d'une vis, mm <sup>2</sup>
d	Diamètre nominal d'une vis, mm

## INTRODUCTION

Dans le réseau de distribution et dans les postes d'Hydro-Québec, on utilise une grande variété de boulons (matériaux, dimensions, grades, fournisseurs, etc.) (voir figure 1). Chez TransÉnergie, on dispose déjà d'un grand stock de boulonnerie qui doit être utilisé dans plusieurs catégories d'applications. Souvent il y a manque de marquage sur les boulons, ce qui rend la tâche très difficile pour les gens qui utilisent ces boulons et peut les amener parfois à ne pas faire des choix adéquats pour les applications appropriées. Notre mandat dans ce projet va être de fournir un moyen capable de résoudre ce problème et de rendre plus facile l'identification d'un boulon. Ceci par la conception d'un appareil ou d'un autre moyen qui peut être disponible dans les postes et qui permet de donner une information précise et rapide aux employés.



Figure 1 Lots de boulons normalisés



Suite à nos contacts et visites chez notre client TransÉnergie (Hydro-Québec), nous avons pu prendre conscience des problèmes que peuvent causer les éléments de fixation filetés ou la boulonnerie s'ils sont installés d'une façon inadéquate. Nous pouvons alors imaginer les inconvénients qu'ils peuvent provoquer surtout pour le fonctionnement et la sécurité. On rappelle qu'on utilise les boulons et les tiges filetés dans les postes de transformation et de distribution (voir figure 2) pour deux catégories d'applications, d'une part pour les structures porteuses et d'autre part, pour l'appareillage et les équipements électriques.



Figure 2 Poste de transformation de Boucherville (735 - 315 kV)

Après avoir acquis une compréhension du problème, nous nous sommes fixés un ensemble d'objectifs qui sont les suivants :

- Identifier et analyser la situation actuelle avec la boulonnerie (logistique, commande, contrôle de réception, stockage, traçabilité,...);
- Développer une méthodologie des essais d'identification;
- Concevoir et valider le dispositif servant à l'identification dans les postes.

Lors des entretiens avec notre client, il nous a fait part des problèmes relatifs à la boulonnerie auxquels sont confrontés les employés dans les postes d'Hydro-Québec. En effet, nous avons pu constater que ces éléments, bien que simples, peuvent provoquer d'importants problèmes par rapport à leur identification et utilisation. Ci-dessous, nous présentons une liste non exhaustive des variables que notre client est amené à gérer, chaque fois qu'il a besoin d'installer ou d'assembler de nouveaux équipements, appareillages, structures ou pour la maintenance. À titre d'exemple, la figure 3 nous donne une idée de la difficulté d'identification du grade. Sur cette figure, nous pouvons voir sur les têtes des vis que pour un lot de vis de mêmes dimensions mais de différents marquages, ces derniers ne respectent pas toujours une norme applicable au Canada. Dans ce cas, ils réfèrent probablement à une norme européenne ou autre.

- Plusieurs normes (SAE, ASTM, ISO ...)
- Plusieurs fournisseurs
- Différentes dimensions, types d'écrous, vis et tiges filetées (aucun marquage )
- Plusieurs matériaux, grades, revêtements, ...
- Multiples catégories d'applications chez TransÉnergie
  - Structures
  - Disjoncteurs
  - Isolateurs, etc.

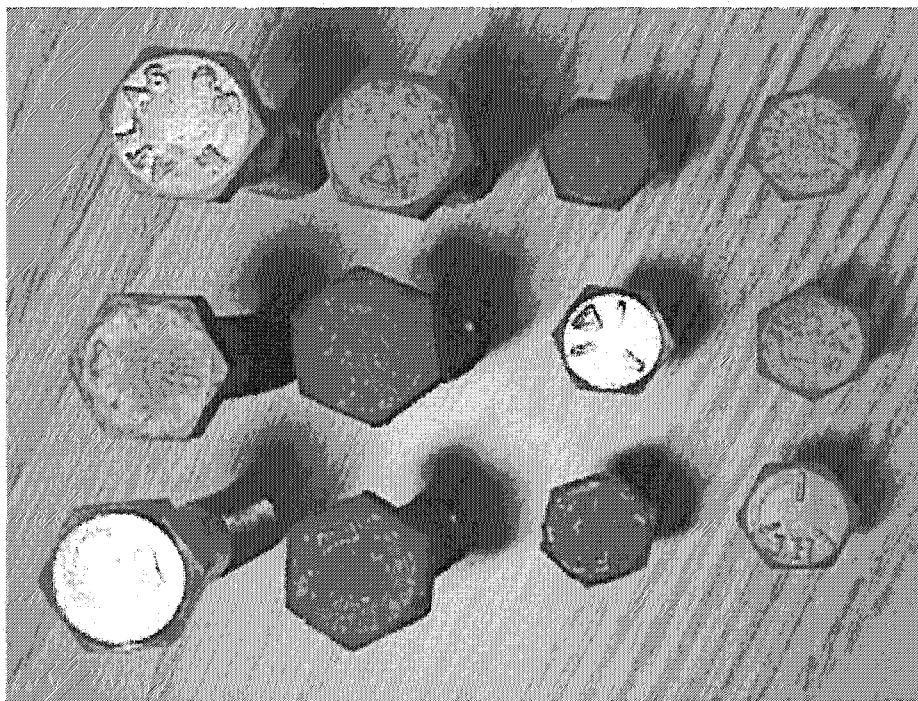


Figure 3 Lot de vis recueillies d'un magasin de TransÉnergie

Le présent document résume les travaux effectués dans le cadre de ce projet en cinq chapitres. D'abord, dans le premier une revue de la littérature (normes et théorie de la relation "dureté – résistance mécanique") est présentée. Le deuxième chapitre comporte la méthodologie de l'identification des grades des boulons et les résultats obtenus. La conception et l'étude de l'appareil de l'identification sont traitées dans le troisième chapitre. Ensuite, les difficultés reliées à la lecture des résultats sont présentées au quatrième chapitre moyennant une analyse et une optimisation. Finalement, dans le cinquième chapitre nous présentons les étapes de calibrage et l'expérimentation de l'appareil réalisé.

## **CHAPITRE 1**

### **REVUE DE LA LITTÉRATURE**

#### **1.1 Introduction**

L'objectif de ce chapitre est de dresser un récapitulatif sur les normes relatives aux propriétés mécaniques de la boulonnerie (vis, écrous et tiges filetées) et de certains travaux en relation avec la dureté des matériaux métalliques, des aciers, particulièrement. Ceci va nous permettre par la suite de spécifier les essais mécaniques requis et la méthodologie à adopter pour l'identification du grade des éléments de fixations filetés.

Avant d'exploiter les relations expérimentales mettant en jeu la dureté et la résistance à la rupture, il est nécessaire de bien comprendre la théorie qui a été développée jusqu'à nos jours et de montrer le cheminement qui a conduit à l'obtention de la valeur de la résistance ultime à partir de la dureté.

#### **1.2 Revue des normes et marquages**

Pour vérifier les propriétés mécaniques d'un élément de fixation fileté, les normes applicables au Canada dans ce domaine ISO, ASTM et SAE suggèrent une série d'essais à effectuer. Dans le cadre de notre projet, le problème consiste à déterminer le grade (ou classe) d'un boulon, ou à le vérifier pour un boulon dont nous connaissons déjà ce paramètre. On rappelle que le grade d'un boulon s'identifie par une valeur de contrainte éprouvée et une valeur de résistance ultime. Les tableaux (I-III) présentent les différentes normes pour les différents grades, les propriétés mécaniques correspondantes.

Tableau I

## Caractéristiques mécaniques des boulons selon SAE J429





SAE Grade	Diameter $d$ (in.)	Proof Load (Strength) <sup>a</sup> $S_p$ (ksi)	Yield Strength <sup>b</sup> $S_y$ (ksi)	Tensile Strength $S_u$ (ksi)	Elongation, Minimum (%)	Reduction of Area, Minimum (%)	Core Hardness, Rockwell		Grade Identification Marking on Bolt Head
							Min	Max	
1	$\frac{1}{4}$ thru $1\frac{1}{2}$	33	36	60	18	35	B70	B100	None
2	$\frac{1}{4}$ thru $\frac{3}{4}$	55	57	74	18	35	B80	B100	None
2	Over $\frac{3}{4}$ to $1\frac{1}{2}$	33	36	60	18	35	B70	B100	None
5	$\frac{1}{4}$ thru 1	85	92	120	14	35	C25	C34	
5	Over 1 to $1\frac{1}{2}$	74	81	105	14	35	C19	C30	
5.2	$\frac{1}{4}$ thru 1	85	92	120	14	35	C26	C36	
7	$\frac{1}{4}$ thru $1\frac{1}{2}$	105	115	133	12	35	C28	C34	
8	$\frac{1}{4}$ thru $1\frac{1}{2}$	120	130	150	12	35	C33	C39	

Tableau II

## Caractéristiques mécaniques des boulons selon ISO 898

Para- graphe n°	Caractéristique		Classe de qualité											
			3.6	4.6	4.8	5.6	5.8	6.8	8.8 <sup>1)</sup> <i>d</i> ≤ 16 mm	8.8 <sup>1)</sup> <i>d</i> > 16 mm <sup>2)</sup>	9.8 <sup>3)</sup>	10.9	12.9	
5.1 et 5.2	Résistance à la traction, <i>R<sub>m</sub></i> <sup>5)</sup> , N/mm <sup>2</sup>	nom.	300	400		500		600	800	800	900	1 000	1 200	
		min.	330	400	420	500	520	600	800	830	900	1 040	1 220	
5.3	Dureté Vickers, HV, <i>F</i> = 98 N	min.	95	120	130	155	160	190	250	255	290	320	365	
		max.	250						320	335	360	380	435	
5.4	Dureté Brinell, HB, <i>F</i> = 30 lbf <sup>2)</sup>	min.	90	114	124	147	152	181	238	242	276	304	366	
		max.	238						304	318	342	361	414	
5.5	Dureté Rockwell, HR	min.	HRB	52	67	71	79	82	89	—	—	—	—	—
			HRC	—	—	—	—	—	—	—	22	23	28	32
		max.	HRB	99,5						—	—	—	—	—
			HRC	—						32	34	37	39	44
5.6	Dureté superficielle, HV 0,3	max.	—						6)					
5.7	Limite inférieure d'écoulement <sup>7)</sup> , <i>R<sub>eL</sub></i> , N/mm <sup>2</sup>	nom.	180	240	320	300	400	480	—	—	—	—	—	
		min.	190	240	340	300	420	480	—	—	—	—	—	
5.8	Limite conventionnelle d'élasticité <i>R<sub>p0.2</sub></i> , N/mm <sup>2</sup>	nom.	—						640	640	720	900	1 060	
		min.	—						640	660	720	940	1 100	
5.9	Contrainte à la charge d'épreuve, <i>S<sub>p</sub></i> <sup><i>S<sub>p</sub>/R<sub>eL</sub></i> ou <i>S<sub>p</sub>/R<sub>p0.2</sub></i></sup> , N/mm <sup>2</sup>		0,94	0,94	0,91	0,93	0,90	0,92	0,91	0,91	0,90	0,88	0,88	
			180	225	310	280	380	440	580	600	650	830	970	
5.10	Allongement pour cent après rupture, <i>A</i>	min.	25	22	14	20	10	8	12	12	10	9	8	
5.11	Résistance à la traction avec la cale biaisée <sup>5)</sup>		Les valeurs pour vis et boulons entiers (pas les goujons) ne doivent pas être inférieures aux valeurs minimales de résistance à la traction indiquées en 5.2											
5.12	Résilience, <i>J</i>	min.	—		25		—		30	30	25	20	15	
5.13	Solidité de la tête		aucune rupture											
5.14	Hauteur minimale de la zone du filetage non décarburée, <i>E</i>		—						$\frac{1}{2} H_1$		$\frac{2}{3} H_1$	$\frac{3}{4} H_1$		
	Profondeur maximale de décarburation totale, <i>G</i>	mm	—						0,015					

Tableau III

Équivalence entre les grades et classes des boulons

CLASSE- ISO	Désignation	4,6	5,8	6,8	8,8	10,9	12,9	14,9
GRADE- SAE	Désignation	1	2	3	5	8	--	--
Brinell	min.	110	140	170	225	280	330	390
	max.	170	215	245	300	365	425	--
Rockwell	HRB	min.	63	78	88	--	--	--
		max.	88	97	102	--	--	--
	HRC	min.	--	--	--	18	27	34
		max.	--	--	--	31	38	44

### Marquage

Le grade d'une vis ou d'un écrou doit être identifié rapidement par le marquage sur la tête de vis ou sur l'une des surfaces d'appui d'un écrou. La figure 4 nous voyons quelques exemples de ces marquages sur les écrous, et la figure 5 sur les vis. Le tableau récapitulatif de l'annexe 1 donne les différents marquages selon les normes ASTM, SAE et ISO. Mais, malheureusement, dans la pratique, il y a plusieurs problèmes : ces marquages ne sont pas toujours présents ou bien ne sont pas identifiables car il s'agit de la boulonnerie spéciale, ou ils sont relatifs à des normes autres que celles applicables en Amérique Nord.

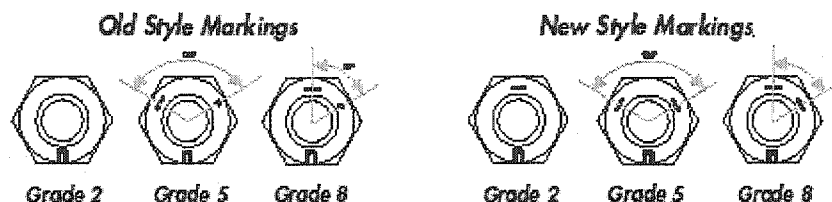


Figure 4 Marquage sur les écrous selon la norme SAE J995

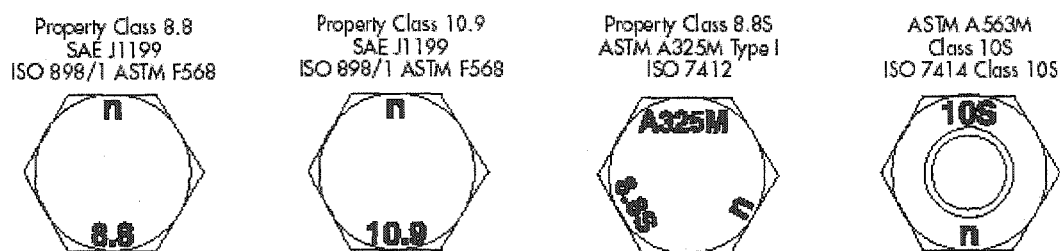


Figure 5 Exemples de marquage sur les têtes des vis selon ISO 898

Comme l'indiquent les normes déjà montrées, le grade d'un boulons s'identifie par sa valeur de résistance à la rupture. Toutefois, dans les mêmes normes il est indiqué des intervalles de dureté recommandés pour chaque grade. Dans la suite de ce chapitre, nous allons essayer d'étudier, d'analyser et de voir les limitations qui existent dans la relation qui relie la résistance à la rupture et la dureté. On rappelle que les essais de dureté présentent les avantages suivants :

- Simples, rapides et économiques;
- Non destructifs;
- Ne nécessitent pas de montages spéciaux comme le cas des essais de traction.

### 1.3 Théorie de la relation "dureté – résistance mécanique"

Le test de dureté peut être utilisé pour estimer d'autres propriétés mécaniques, notamment la résistance à la rupture  $R_m$ . Une estimation de cette dernière peut être très utile si on ne peut y l'avoir directement.

De nombreuses relations ont été établies entre la valeur de la dureté et la résistance à la rupture. Brinell a remarqué que la valeur de la dureté HB valait approximativement deux fois la valeur de  $R_m$  (en ksi) pour l'acier. Il faut noter toutefois que cette relation n'est

valable que pour une bille de 10 mm et une charge appliquée sur le matériau de 3000 kgf.

### 1.3.1 La dureté Brinell

Si la notion de dureté est l'une des plus intuitives, sa mesure correspond en pratique à celle de la résistance à la pénétration locale du matériau considéré. La dureté est alors une propriété physique complexe et difficile à interpréter, qui dépend non seulement des caractéristiques de ce matériau, mais aussi de la nature et de la forme du pénétrateur et du mode de pénétration (D. FRANÇOIS (1984)). Dans le cadre du projet, nous utiliserons l'essai de dureté par pénétration de type Brinell. Dans l'essai proposé par Brinell, le pénétrateur est une bille polie en acier trempé ou en carbure de tungstène (indentation sphérique). Son diamètre  $D$  vaut normalement 10 mm, mais peut aussi être de 5, 2, 5 et 1 mm. La bille est appliquée sur le métal avec une charge  $F$ . Après suppression de la charge, elle laisse dans le métal une empreinte circulaire permanente dont on mesure le diamètre  $d$ , d'autant plus grand que la bille a pénétré plus profondément dans le métal, indiquant donc que celui-ci est moins dur (figure 6). La mesure de l'empreinte se fait souvent avec une lunette à oculaire micrométrique d'un grossissement de l'ordre de 20. La dureté s'exprime par le rapport de la charge  $F$  à la surface  $S$  de la calotte sphérique imprimée dans le métal (D. FRANÇOIS (1984)):

$$HB = \frac{F}{S} = \frac{2 \cdot 0,102 \cdot F}{\pi D (D - \sqrt{D^2 - d^2})} \text{ en } \left[ \frac{\text{kgf}}{\text{mm}^2} \right] \quad (1.1)$$

avec  $F$  (N) charge appliquée

$D$  (mm) diamètre de la bille

$d$  (mm) diamètre de l'empreinte



Note pour l'équation (1.1) : le coefficient 0.102 dans le numérateur sert à l'homogénéité

des unités  $0.102 = g^{-1} = \frac{1}{9.81}$  avec  $g = 9.81 m.s^{-2}$

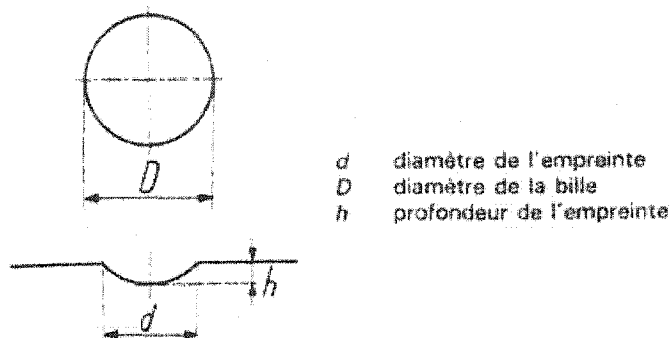


Figure 6 Essai Brinell<sup>1</sup>

### 1.3.2 La dureté Meyer

Il est nécessaire ici d'introduire la dureté Meyer pour bien comprendre la suite de la théorie. Bien que la dureté Meyer mette également en jeu une indentation sphérique comme Brinell, il existe une différence entre les deux duretés. La dureté Meyer ne considère pas la surface de la calotte sphérique mais plutôt la surface de l'empreinte projetée (D. FRANÇOIS (1984)). Ainsi :

$$HM = \frac{4 \cdot 0,102 \cdot F}{\pi \cdot d^2} \quad \text{en} \quad \left[ \frac{kgf}{mm^2} \right] \quad (1.2)$$

avec  $F$  (N) charge appliquée

$d$  (mm) diamètre de l'empreinte

<sup>1</sup> Tiré et adapté de D. FRANÇOIS (1984)

Une relation plus fondamentale entre la charge appliquée et le diamètre de l'empreinte est donnée par la loi de Meyer :

$$F = k \cdot d^m \quad (1.3)$$

où  $k$  et  $m$  sont constants pour un matériau donné :  $m$  est appelé « indice de Meyer » et  $k$  correspond à la charge qu'il faut appliquer pour obtenir un diamètre d'empreinte d'une unité. Dans les métaux durs ou écrouis, on observe autour de l'empreinte la formation d'un bourrelet. Dans les métaux mous ou recuits, au contraire, on observe un enfoncement général de la surface de l'empreinte. Dans le premier cas  $m$  vaut 2 à 2,15 environ et dans le second, 2,3 à 2,6. (figure 7).

(a)  $m = 2 - 2,15$  (métaux durs écrouis)



(b)  $m = 2,3 - 2,6$  (métaux mous)



(c)  $m = 2,15 - 2,3$  (métaux relativement durs)



Figure 7 Vues de coupe des empreintes obtenues par indentation sphérique<sup>1</sup>

Si l'on utilise différents diamètres de bille  $D_1, D_2, D_3, \dots$  qui donnent des diamètres d'empreintes  $d_1, d_2, d_3, \dots$  au cours d'essais effectués sous la même charge  $F$ , alors la loi de Meyer donne :

<sup>1</sup> Tiré et adapté de Bailey, John A. et al. (2000)

$$F = k_1 \cdot d_1^{m1} = k_2 \cdot d_2^{m2} = k_3 \cdot d_3^{m3} = \dots \quad (1.4)$$

Meyer détermina expérimentalement que, pour un matériau donné, la valeur de  $m$  ne dépend pratiquement pas de  $D$ , et que  $k$  et  $D$  varient inversement l'un par rapport à l'autre tel que :

$$K_d = k_1 \cdot D_1^{m-2} = k_2 \cdot D_2^{m-2} = k_3 \cdot D_3^{m-2} = \dots = \text{Constante} \quad (1.5)$$

L'équation (1.4) devient alors :

$$F = K_d \frac{d_1^m}{D_1^{m-2}} = K_d \frac{d_2^m}{D_2^{m-2}} = K_d \frac{d_3^m}{D_3^{m-2}} = \dots$$

Cette équation peut être exprimée sous une forme plus simple :

$$\frac{F}{d^2} = K_d \cdot \left( \frac{d}{D} \right)^{m-2} \quad \text{ou bien} \quad \frac{F}{D^2} = K_d \cdot \left( \frac{d}{D} \right)^m \quad (1.6a) \text{ et } (1.6b)$$

où  $K_d$  est une constante.

L'équation (1.6a) montre que pour des indentations géométriques similaires (voir figure 8) pour un rapport  $d/D$  fixé, le ratio  $F/d^2$ , et par conséquent la dureté Meyer, sont constants. De façon similaire, l'équation (1.6b) montre que les empreintes produites par des valeurs différentes de charge  $F$  et de diamètre de bille  $D$  seront géométriquement similaires (i.e.  $d/D$  constant) et donneront des mêmes valeurs de dureté si le rapport  $F/D^2$  reste constant. Ainsi, une même valeur de dureté sera obtenue en utilisant une charge de 3000 kg et une bille de 10 mm qu'en utilisant une charge de 750 kg et une bille de 5 mm, puisque dans ce cas,  $F/D^2 = 30$  d'après ISO 6506.

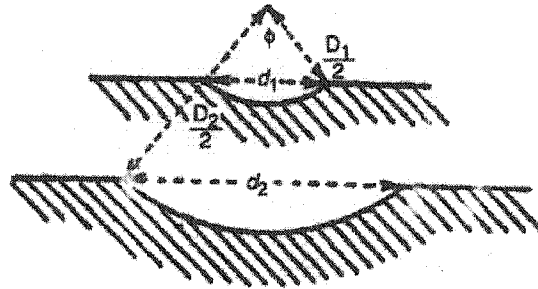


Figure 8 Indentations géométriques similaires ( $d/D$  constant)<sup>1</sup>

Compte tenu du fait qu'initialement la force a été fixée à 3000 kgf et le diamètre de bille à 10mm (définition donnée par Brinell), la valeur du ratio  $F/D^2 = 30$  est donc utilisée comme un point de départ.

### 1.3.3 Introduction à la théorie de la plasticité

Au cours d'une mesure de dureté, un pénétrateur suffisamment dur pour ne pas être déformé par le matériau à tester, et de forme variable, est enfoncé dans le métal par l'action d'une force constante appliquée dans des conditions bien définies. Au contact d'une bille (indentation sphérique) sur un bloc plan, la répartition des contraintes et des déformations, si la limite d'élasticité n'est pas dépassée, est donnée par Hertz. Si la bille a un diamètre  $D$  et que la charge qui lui est appliquée vaut  $F$ , le diamètre  $d$  de l'aire de contact vaut (D. FRANÇOIS (1984)) :

$$d = 1,442 \cdot \left( \frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot (FD)^{\frac{1}{3}} \quad (1.7)$$

<sup>1</sup> Tiré et adapté de Bailey, John A. et al. (2000)

Avec  $\nu_1, \nu_2, E_1, E_2$  qui sont respectivement les coefficients de Poisson et les modules de Young de la bille (indice 1) et du matériau testé (indice 2). La contrainte moyenne sur l'aire de contact vaut  $\sigma_{moy} = -4F/\pi d^2$  et la contrainte maximale au centre de cette aire est telle que  $\sigma_{max} = 1,5\sigma_{moy}$  (D. FRANÇOIS (1984)). Ces contraintes sont donc proportionnelles à  $(F/D^2)^{1/3}$ . Le contact cesse d'être élastique quand  $\sigma_{max}$  atteint  $1,613 R_p$  ( $R_p$  est la limite d'élasticité). La théorie de la plasticité montre alors que  $\sigma_{moy} \approx 3R_p$  pour un matériau sans écrouissage. A l'autre extrême, un matériau ayant un indice d'écrouissage (voir définition plus loin dans la section 1.3.4)  $n=1$  se comporterait comme un matériau élastique et on aurait (F. MONTHEILLET (1996)) :

$$\sigma_{moy} = 5,652 \cdot \frac{d}{D} \cdot \left( \frac{d\sigma}{d\varepsilon} \right) \quad (1.8)$$

Plus généralement, on s'attend à ce que la contrainte équivalente de Von Mises  $\bar{\sigma}$  sous le pénétrateur soit proportionnelle à la contrainte moyenne sur l'aire de contact  $\sigma_{moy}$  et que la déformation équivalente  $\bar{\varepsilon}$  soit proportionnelle à  $d/D$ . Si la loi de consolidation (voir figure 6) est de la forme :

$$\bar{\sigma} = R_m \cdot \left( \frac{e}{n} \right)^n \cdot \bar{\varepsilon}^n \quad (1.9)$$

Avec  $n$  qui est l'indice d'écrouissage,  $e$  la base des logarithmes népériens,  $\bar{\varepsilon}$  la déformation équivalente de Von Mises et  $R_m$  la résistance à la rupture. La formule précédente (1.9) se généralise sous la forme :

$$\sigma_{moy} = \text{constante} \cdot R_m \cdot \left( \frac{e}{n} \right)^n \cdot \left( \frac{d}{D} \right)^n \text{ avec } e = e^1 = 2,71 \quad (1.10)$$

Ce résultat a été retrouvé expérimentalement par Tabor. Ce dernier résultat est particulièrement intéressant puisqu'il va nous permettre de faire le lien entre la dureté Meyer et  $R_m$  dans un premier temps, puis entre HB et  $R_m$ . Cependant, avant de développer des relations plus complexes mettant en jeu l'indice d'écrouissage, il est nécessaire de le définir et de développer plus en détails la loi de consolidation.

#### 1.3.4 Ecouissage – Loi de consolidation

Concernant la déformation à froid (F. MONTHEILLET (1996) et D. FRANÇOIS (1984)), les dépendances de la résistance des matériaux vis à vis de la vitesse de déformation et de la température peuvent être en général négligées, de telle sorte que la loi de comportement des matériaux est du type  $\bar{\sigma} = f(\bar{\epsilon})$  appelée « loi d'écrouissage ». Notons que la déformation élastique, le plus souvent très faible devant les déformations plastiques imposées lors de l'indentation sphérique, n'est pas prise en compte dans ces lois. La fonction  $f(\bar{\epsilon})$  croît généralement avec une pente de plus en plus faible. On nomme « coefficient d'écrouissage » la dérivée doublement logarithmique :

$$n = \frac{\partial \ln \bar{\sigma}}{\partial \ln \bar{\epsilon}} \quad (1.11)$$

Il existe plusieurs lois d'écrouissage utilisées dans le cadre de la mise en forme à froid. Dans le cadre de notre projet, c'est la loi « Puissance » ou « loi de Hollomon » qui est utilisée (figure 9). Cette loi s'écrit (F. MONTHEILLET (1996)):

$$\bar{\sigma} = \sigma_1 \cdot \bar{\epsilon}^n \quad (1.12)$$

avec  $\sigma_1$  qui est la valeur de contrainte d'écoulement pour une déformation plastique  $\bar{\epsilon} = 1$ .

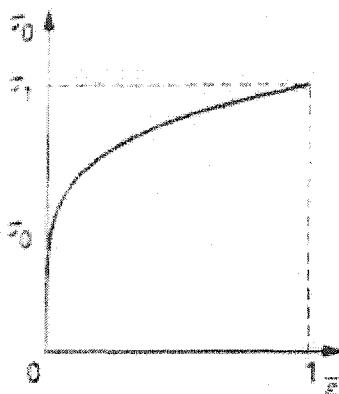


Figure 9 Représentation de la loi d'écrouissage « Puissance »

Cette loi très simple convient pour les aciers mi-doux ou mi-durs, ainsi que pour les métaux ou alliages à faible limite d'élasticité. L'indice d'écrouissage peut être obtenu graphiquement à partir de la courbe contrainte – déformation (figure 10). Après avoir tracé le graphe correspondant selon une échelle log-log (linéarisation), la valeur de la pente de la droite correspond au coefficient d'écrouissage. (figure 11).

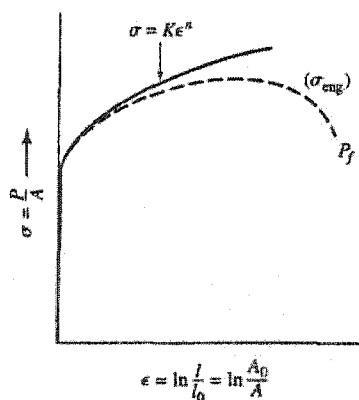


Figure 10 Représentation de la courbe contrainte réelle-déformation réelle  
et de la loi d'écrouissage puissance<sup>1</sup>

<sup>1</sup> A: est l'aire variable, source : Schey, John A. (2000)

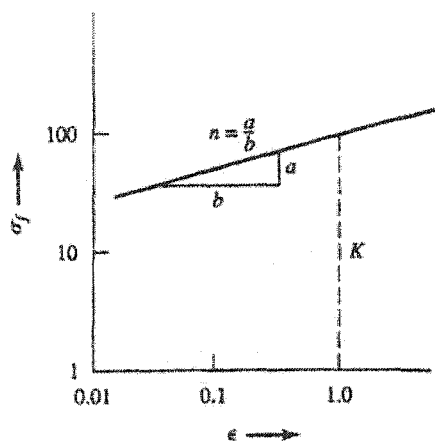


Figure 11 Linéarisation et définition du coefficient d'écrouissage<sup>1</sup>

Quelques valeurs de coefficients d'écrouissage de matériaux typiques sont présentées dans le tableau IV:

Tableau IV

Valeurs de coefficients d'écrouissage de quelques matériaux<sup>2</sup>

Matériau	Traitement thermique	Indice d'écrouissage (n)	Résistance : coefficient (K)	
			MPa	ksi
Acier : 0.05 % C	Recuit	0.26	531	77
Acier : 4340	Recuit	0.15	641	93
Acier : 0.6 % C	Trempé 540 °C (1000 °F)	0.10	1572	228
Acier : 0.6 % C	Trempé 700 °C (1300 °F)	0.19	1227	178
Cuivre	Recuit	0.54	317	46
Laiton 70/30	Recuit	0.49	896	130

<sup>1</sup> source : Schey, John A. (2000)

<sup>2</sup> K correspond à  $\sigma_1$  de l'équation (1.12), source : Bailey, John A. et al. (2000)



### 1.3.5 Relation entre la dureté Brinell et la résistance à la rupture

Nous avons défini précédemment les duretés Meyer et Brinell ainsi que l'indice d'érouissage et nous avons donné quelques relations générales sur la théorie de la plasticité. Grâce aux relations établies jusqu'ici, nous allons pouvoir maintenant relier la dureté Brinell à la résistance à la rupture  $R_m$ .

Nous rappelons que la dureté Meyer est définie comme suit :

$$HM = \sigma_{\text{moy}} = \frac{4 \cdot 0,102 \cdot F}{\pi \cdot d^2} \quad (1.13)$$

Ainsi, le rapport  $HM/HB$  donne :

$$\frac{HM}{HB} = \frac{4 \cdot F \cdot 0,102}{\pi \cdot d^2} \cdot \frac{\pi \cdot D \cdot (D - \sqrt{D^2 - d^2})}{2 \cdot 0,102 \cdot F} = 2 \cdot \left(\frac{D}{d}\right)^2 \cdot \left(1 - \sqrt{1 - \frac{d^2}{D^2}}\right) \quad (1.14)$$

Considérant  $d$  très petit devant  $D$ , l'expression peut être simplifiée à l'aide d'un développement limité à l'ordre 2 (voir annexe 2 pour détails des calculs), ce qui conduit finalement à :

$$\frac{HM}{HB} \approx 1 + \frac{1}{4} \cdot \left(\frac{d}{D}\right)^2 \quad (1.15)$$

D'après la théorie de la plasticité vue précédemment (1.10) : (*Rappel*)

$$\sigma_{\text{moy}} = Cte \cdot R_m \cdot \left(\frac{e}{n}\right)^n \cdot \left(\frac{d}{D}\right)^n \quad \text{Relation de Tabor}$$

Ainsi, comme  $HM = \sigma_{moy}$ , nous avons :

$$\frac{HB}{R_m} = Cte \cdot \left(\frac{e}{n}\right)^n \cdot \left(\frac{d}{D}\right)^n \cdot \frac{1}{1 + \frac{1}{4} \cdot \left(\frac{d}{D}\right)^2} \quad (1.16)$$

Cette dernière relation est importante puisqu'elle fait le lien direct entre la dureté Brinell et la résistance à la rupture  $R_m$ . Le ratio  $HB/R_m$  (relation 1.16) est sensiblement constant tant que  $n$  est inférieur à 0,25 : c'est le cas des aciers, des alliages d'aluminium et des alliages de titane. La dureté, caractéristique obtenue par un essai non destructif, permet ainsi une estimation de la charge de rupture du matériau.

Dans la pratique, on peut considérer que  $HB(MPa) \approx 3 \cdot R_m(MPa)$  (J. Datsko et al. (2001)). Cette formule est utilisable seulement pour les alliages à faible indice d'écrouissage (aciers, alliages d'aluminium et alliages de titane).

Finalement, nous avons obtenu la relation permettant d'obtenir  $R_m$  à partir de  $HB$  directement. Celle-ci nous permettra par la suite d'identifier les grades des éléments filetés étudiés dans le cadre de notre projet.

$$\begin{cases} R_m [MPa] = 3,33 \cdot HB [kg/mm^2] \\ R_m [MPa] = 0,33 \cdot HB [MPa] \end{cases} \quad (1.17)$$

Nous notons que cette relation a été validée expérimentalement par des essais normalisés effectués sur machine Rockwell dans la première phase du projet.

### 1.3.6 Approche de J. Datsko et al. (2001)

#### 1.3.6.1 Relations générales

L'équation utilisée par Meyer met en jeu l'indice  $m$  de Meyer. Toutefois, en comparant la loi de Meyer (formule (1.13)) et la relation de Tabor (formule (1.10)), on note que l'on doit avoir sensiblement  $n = m - 2$  (B. Taljat et al. (1997)). En effet :

$$\sigma_{\text{moy}} = Cte \cdot R_m \cdot \left(\frac{e}{n}\right)^n \cdot \left(\frac{d}{D}\right)^n \quad (1.10) \quad \text{et} \quad HM = \sigma_{\text{moy}} = \frac{4 \cdot 0,102 \cdot F}{\pi \cdot d^2} \quad (1.13) \quad \text{donnent :}$$

$$\sigma_{\text{moy}} = \frac{4 \cdot 0,102 \cdot F}{\pi \cdot d^2} = Cte \cdot R_m \cdot \left(\frac{e}{n}\right)^n \cdot \left(\frac{d}{D}\right)^n$$

soit :

$$\frac{F}{d^2} = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{1}{0,102} \cdot Cte \cdot R_m \cdot \left(\frac{e}{n}\right)^n \cdot \left(\frac{d}{D}\right)^n ;$$

$$F = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{1}{0,102} \cdot Cte \cdot R_m \cdot \left(\frac{e}{n}\right)^n \cdot \left(\frac{d}{D}\right)^{n+2} \cdot D^2 ;$$

$$\frac{F}{D^2} = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{1}{0,102} \cdot Cte \cdot R_m \cdot \left(\frac{e}{n}\right)^n \cdot \left(\frac{d}{D}\right)^{n+2}$$

or d'après (1.6) :

$$\frac{F}{D^2} = K_d \cdot \left(\frac{d}{D}\right)^m$$

En posant,  $\frac{\pi}{4} \cdot \frac{1}{0,102} \cdot Cte \cdot R_m \cdot \left(\frac{e}{n}\right)^n = K_d$ , on en conclut :  $m = n + 2$  ou bien  $n = m - 2$

Nous obtenons donc une relation entre l'indice  $m$  de Meyer et le coefficient d'écroutissage  $n$ . Cette relation a en effet été vérifiée expérimentalement par des essais pour une large gamme de matériaux. Donc, finalement, la relation faisant apparaître l'indice d'écroutissage et que J. Datsko et al. (2001) a utilisée va servir à déterminer le constante  $K_d$  et par la suite la résistance  $R_m$  ( $R_m = K_d/3$ ), s'écrit comme suit:

$$\frac{F}{D^2} = K_d \cdot \left(\frac{d}{D}\right)^{n+2} \quad (1.18)$$

Lorsque l'on calcule l'expression résultante du logarithme de cette équation, nous obtenons alors une équation de droite (relation linéaire de la forme  $y = a \cdot x + b$ ) (figure 12). Si nous développons le logarithme, cela donne :

$$\log\left(\frac{F}{D^2}\right) = \log\left[K_d \cdot \left(\frac{d}{D}\right)^{n+2}\right] = \log(K_d) + \log\left[\left(\frac{d}{D}\right)^{n+2}\right] = \log(K_d) + (n+2) \cdot \log\left(\frac{d}{D}\right) \quad (1.19)$$

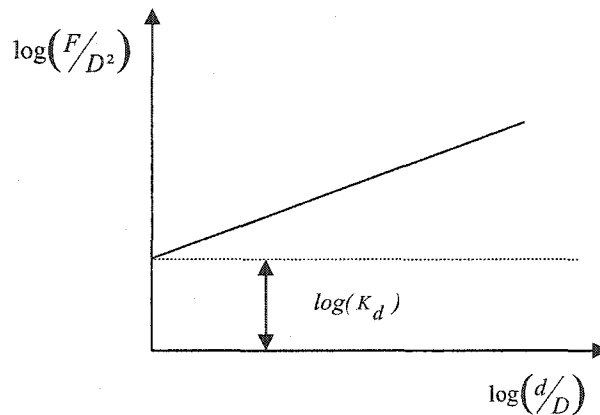


Figure 12 Droite linéarisée obtenue par J. Datsko

$K_d$  correspond à la valeur de  $F/D^2$  pour laquelle  $d/D$  vaut 1. Sa valeur est extrapolée à partir de la droite tracée. Sur le graphe, l'abscisse  $x$  est  $\log(d/D)$  et l'ordonnée  $y$  vaut  $\log(F/D^2)$ . En procédant ainsi, Datsko cherche à obtenir une relation entre  $K_d$  et  $R_m$ .  $R_m$  est en effet obtenu expérimentalement pour chaque matériau par un essai de traction. Datsko a effectué de nombreux tests de dureté sur divers matériaux. Pour chaque test de matériau, il a fait varier la charge appliquée  $F$  et le diamètre du pénétrateur  $D$ . Les résultats obtenus ont été utilisés dans la relation précédente (1.18), et seront traités à la section suivante, dans laquelle nous essayerons de résumer la méthodologie des travaux de J. Datsko, en vue d'une éventuelle utilisation pour d'autres métaux autre que les aciers.

### 1.3.6.2 Méthodologie des travaux de J. Datsko et al. (2001)

J. Datsko a procédé au test de dureté de plus de 31 matériaux au total. D'un autre côté, pour chacun de ces matériaux, il a effectué un essai de traction pour obtenir la valeur de  $R_m$ . L'essai de traction a été effectué selon la procédure standard prévue par la norme ASTM-E8.

Quant aux tests de dureté, ils ont été effectués sur un appareil de mesure de dureté Brinell (indentation sphérique). L'objectif de cette étude était d'obtenir une gamme de valeurs de  $d/D$  (division du diamètre d'empreinte  $d$  par le diamètre du pénétrateur  $D$ ) aussi large que possible car la précision de la méthodologie appliquée augmente avec le nombre de valeurs de  $d/D$ . Ainsi, J. Datsko a choisi d'appliquer des charges de 500, 1000, 1500, 2000 et 3000 kgf sur une bille de 10 mm de diamètre. Comme les métaux sélectionnés pour cette étude étaient des matériaux ductiles tels que l'aluminium ou très durs comme l'acier, des tests additionnels ont été réalisés sur une machine de tension-compression Baldwin avec des billes de diamètre 12,7, 19,5 et 25,4 mm. Les charges appliquées allaient de 45 kgf pour les matériaux ductiles jusqu'à 4100 kgf pour les

matériaux les plus durs. Pour chaque matériau, un tableau a été dressé, présentant la charge appliquée au cours du test, deux mesures du diamètre de l'empreinte (effectuées à 90° l'une par rapport à l'autre) et la moyenne obtenue pour le diamètre de l'empreinte. Les valeurs de  $F/D^2$  (MPa),  $d/D$ ,  $\log(F/D^2)$  et  $\log(d/D)$  ont également été calculées afin de tracer le graphique (figure 12).

### 1.3.6.3 Résultats des expériences et discussion

Une régression linéaire du graphique permet alors d'obtenir l'équation de la droite et d'en déduire la valeur de  $K_{di}$  pour chaque matériau (voir figure 13). Connaissant  $R_m$  par les essais, J. Datsko a calculé alors le rapport  $R_m/K_d$  et remarqué que pour l'ensemble des échantillons, des matériaux mous aux matériaux durs,  $R_m/K_d$  vaut environ 1/3. La moyenne de ces rapports se situe autour de 0,35.

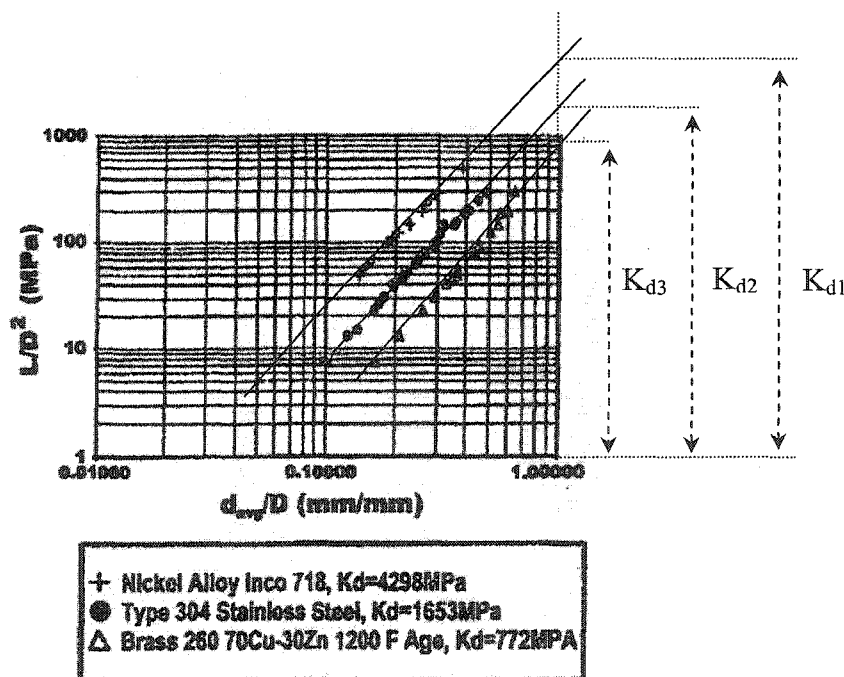


Figure 13 Graphe des points obtenus par J. Datsko et al (2001) pour 3 métaux

Cette relation ( $R_m/K_d=1/3$ ) permet donc d'estimer la résistance à la rupture  $R_m$  à partir d'un simple test de dureté Brinell. Il suffit en effet de connaître  $K_d$  pour estimer  $R_m$ . Cette relation est particulièrement intéressante car, théoriquement, seules deux mesures de dureté effectuées pour deux charges différentes suffisent pour déterminer  $K_d$  pour un matériau donné et ainsi estimer  $R_m$ . Deux points déterminent en effet la droite sur le graphique log-log. Il est cependant recommandé d'utiliser au moins 5 valeurs de  $d/D$  et d'éviter les valeurs trop faibles de ce rapport. Si l'on utilise un petit élément de matériau pour le test, il faut s'assurer qu'il est bien représentatif des propriétés mécaniques de la pièce dont il provient.

Pour estimer l'exactitude des résultats, J. Datsko a comparé les valeurs expérimentales et les valeurs estimées de  $R_m$ . L'erreur obtenue est faible et ne dépasse pas 10% dans la majorité des cas. La moyenne des erreurs obtenues sur l'estimation de  $R_m$  se situe à peu près de 1,6%. L'auteur fait remarquer que la précision des résultats est meilleure lorsque différents diamètres de pénétrateurs sont utilisés. Cette méthode qui peut s'appliquer à une large gamme de matériaux, est rapide, simple et limite l'utilisation de machines d'essai.

#### 1.4 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre plusieurs lois empiriques existantes de la dureté Brinell. Il en existe également pour les autres échelles de dureté des matériaux. Avant d'accéder à la valeur de la résistance à la rupture  $R_m$  puis à l'identification des grades des éléments filetés, il a été nécessaire de bien regarder la théorie sur laquelle s'appuient les mesures de dureté. En effet, les différentes méthodes d'estimation de la résistance à la rupture à partir de la dureté découlent toutes en fin de compte des mêmes principes : la théorie de la plasticité et la loi de consolidation (écrouissage).

## CHAPITRE 2

### MÉTHODOLOGIE DE L'IDENTIFICATION ET RÉSULTATS OBTENUS

#### 2.1 Introduction

Suite à la recherche bibliographique effectuée, nous allons établir une méthodologie pour la première phase du projet. D'après les normes ASTM, SAE et ISO, pour identifier le grade d'un boulon, nous devons procéder à des essais de traction, sauf que ces essais demandent beaucoup de temps et nécessitent un appareillage assez coûteux qui ne peut être disponible dans tous les postes de TransÉnergie. Or il existe une relation empirique entre la résistance et la dureté, pour différents matériaux métalliques tels qu'aciers, alliages d'aluminium et alliages de cuivre, dont la précision dépend directement de la précision de mesure de la dureté. A. Nayebi et al. (2002) et J. Datsko et al. (2001) ont pu démontrer et prouver, soit théoriquement, soit expérimentalement que cette relation donne une estimation assez précise de la valeur de la résistance (on note que généralement le rapport dureté/résistance est d'environ 0,3 ( $R_m$  ou  $S_u$ : Résistance ultime à la traction en MPa)). Cette relation est déterminante pour les vis de longueurs inférieures à 2,5 fois leur diamètre et qui ne peuvent donc être soumises à un essai de traction. Toutefois, cette relation (voir relations 2.1), reste à valider expérimentalement pour les cas généraux.

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{R_m (MPa)}{HB (kgf/mm^2)} \approx 3.3 \\ \frac{R_m (psi)}{HB} \approx 500 \end{array} \right. \quad (2.1)$$



## 2.2 Essais effectués à l'IREQ ( Institut de Recherche d'Hydro-Québec )

Jusqu'à présent, la filiale TransÉnergie faisait réaliser ses essais pour la boulonnerie par l'IREQ. Il faut compter au minimum une semaine pour effectuer les essais : ceux-ci permettent d'identifier les éléments de boulonnerie. Cette situation ne favorise pas toujours l'avancement des travaux engagés à TransÉnergie. À titre indicatif, ces essais sont généralement les suivants :

- ❑ Observations visuelles (dimensions, traitements de surface, marquage, ...);
- ❑ Analyse chimique (spectrométrie : composition chimique, % de carbone, et autres éléments additifs : Mn, P, S, Si, Cr, Mo, V,...);
- ❑ Essais de dureté;
- ❑ Rupture différée (selon ASTM F519 - 97). Les échantillons sont maintenus durant 200 heures sous une contrainte d'environ 75% de celle de limite ultime du matériau. Le but de cet essai est de vérifier si les tiges ou les vis ont été fragilisées par l'hydrogène à cause des traitements de surface qu'ils ont subis;
- ❑ Essai de fragilisation (selon ASTM A143). L'essai consiste à donner un coup brusque à l'aide d'une masse de 2 livres, sur un boulon galvanisé et un autre non-galvanisé et de comparer les résultats. Si les boulons non galvanisés résistent à l'impact (ne montrent aucune indication de fissuration), mais que suite à l'opération de galvanisation, des fissures apparaissent sur les boulons galvanisés, ces derniers seront considérés comme fragilisés.

## 2.3 Démarche suivie

Une série d'essais a été effectuée au cours la première étape. En effet, nous avons commencé par faire les essais de dureté et les essais de traction sur des boulons normalisés (voir figure 14) dont nous connaissons déjà les propriétés mécaniques standardisées et de juger l'exactitude et la précision de la relation d'équivalence entre les

mesures de dureté et celles de la résistance à la traction. Ces essais vont nous permettre de voir si les résultats sont concluants ou non. Ainsi, nous pourrions nous engager dans la conception d'un appareil de mesure de dureté portable. En effet, ce serait un moyen pour rendre la mesure de dureté plus facilement réalisable.

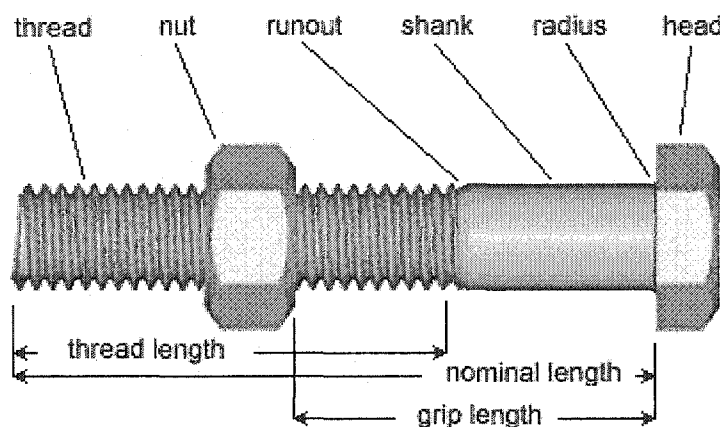


Figure 14 Détails d'un boulon (vis & écrou) normalisé à tête hexagonale

## 2.4 Essais de dureté

Comme il a été déjà mentionné, nous allons commencer par prendre des mesures de dureté sur des boulons pour lesquels nous connaissons le grade, à l'aide d'un appareil de dureté normalisé (voir figure 15). Nous allons faire ces essais sur deux lots de boulons, chaque lot comporte trois boulons (vis + écrou) ayant les mêmes dimensions mais des grades différents (Gr. 2, Gr. 5 et Gr. 8). Le premier lot sera d'une qualité normale (boulonnerie d'usage courant que nous pouvons trouver dans n'importe quelle quincaillerie). Le deuxième lot sera d'une qualité supérieure (ou de précision).

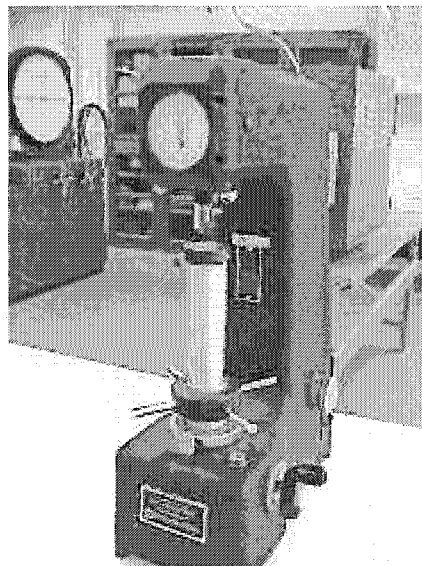


Figure 15 Appareil de dureté Rockwell - Macromet marque BUEHLER

Les mesures effectuées ont été prises à l'aide d'un appareil de dureté ROCKWELL avec un pénétrateur conique ayant une pointe en diamant et sous une charge de 60 kg. Les valeurs mesurées sont relatives à l'échelle A (HRA). À l'aide des tables de conversion, ces mesures ont été converties en dureté Brinell (HB : avec une bille de 10 mm de diamètre et une charge de 3000 kg).

Des séries de mesures de dureté ont été effectuées à l'aide de l'appareil ROCKWELL, les résultats de toutes ces mesures seront traités d'une façon détaillée ci-après pour les écrous ainsi que pour les vis.

#### 2.4.1 Mesures sur les écrous

Pour avoir une valeur représentative de la pièce testée (voir figure 16), la norme ASTM F606 indique les emplacements des mesures de dureté pour les écrous (voir figure 17).

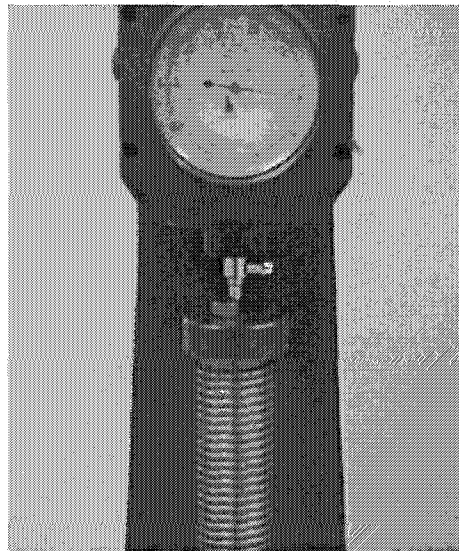
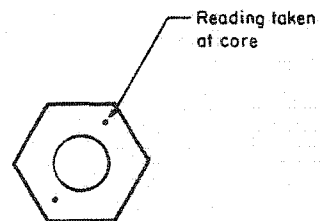
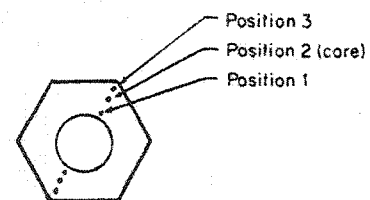


Figure 16 Mesure de la dureté sur un écrou sur l'appareil ROCKWELL



(a) : Non traité thermiquement



(b) : Traité thermiquement

Figure 17 Emplacement des mesures pour les écrous d'après ASTM F606

#### 2.4.2 Mesures sur les vis et tiges filetées

Pour avoir une valeur représentative de la pièce testée (figure 18), la norme ASTM F606 indique les emplacements des mesures de dureté, pour les vis et tiges filetées (figure 19).

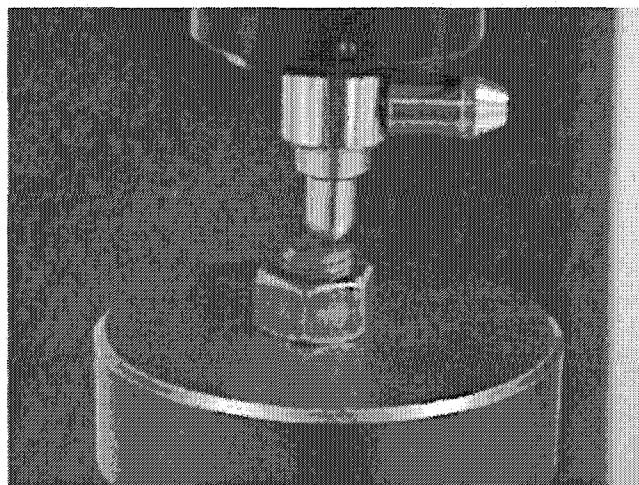


Figure 18 Mesure de la dureté sur une vis sur l'appareil ROCKWELL

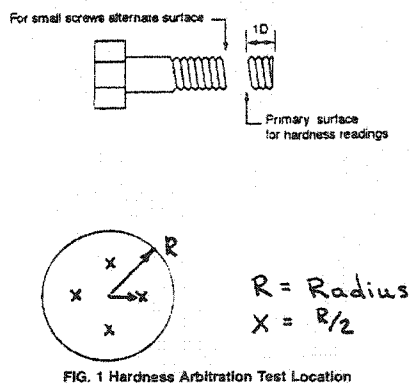


Figure 19 Emplacement des mesures pour les vis selon ASTM F606

## 2.5 Essais de traction

L'objectif de ces essais est de mesurer la valeur de la force qui provoque la rupture de la vis, ce qui va nous permettre de calculer la résistance ultime ( $R_m$  ou  $S_u$ ) et de trouver la valeur expérimental du rapport résistance/dureté afin de comparer cette valeur avec celle

indiquée dans les références utilisées. Les normes montrent la manière avec laquelle ces essais devront être réalisés (voir figure 20).

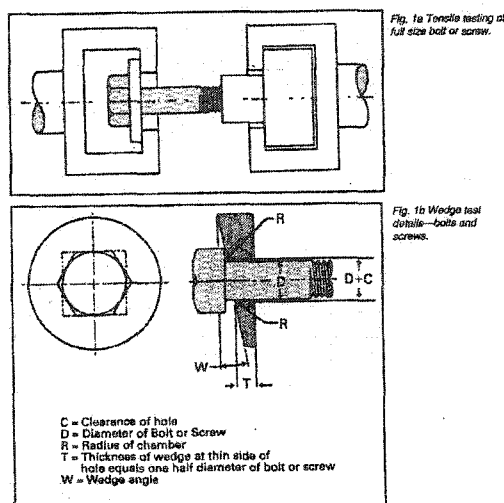


Figure 20 Montage de l'essai de traction selon la norme ASTM F606

### 2.5.1 Montage des essais de traction

Un montage a été conçu pour réaliser les essais de traction. Les pièces qui constituent ce montage ont été surdimensionnées, ceci afin de s'assurer que les déformations induites lors de l'essai sont subies uniquement par le boulon.

La figure 21 montre le montage réalisé et la façon dont ce dispositif a été installé sur la machine de traction (MTS 810).

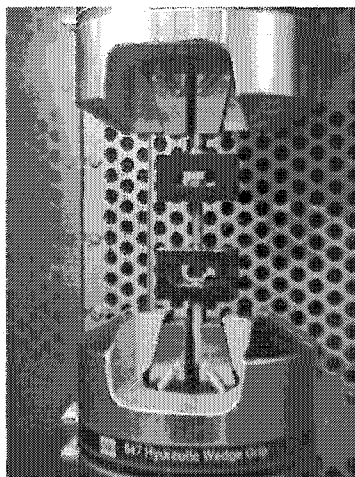


Figure 21 Montage de l'essai de traction sur MTS 810

### 2.5.2 Résultats des essais

Comme pour les essais de dureté, les essais de traction ont été effectués sur les deux lots de boulons comportant chacun trois boulons de grades différents (Gr. 2, Gr. 5 et Gr. 8). Les tableaux V et VI illustrent les résultats de ces essais et donnent une comparaison par rapport aux exigences de la norme SAE. Dans ces tableaux, on voit que pour les boulons de qualité dite supérieure les résultats sont plus proches de la norme, ceci s'explique par un contrôle de qualité plus rigoureux. La figure 22 et la figure 23 montrent les allures des courbes de traction.

Tableau V

Résultats des essais de traction – qualité ordinaire

	Force ( N )	Force ( lb )	Section (In <sup>2</sup> )	Rm mesuré ( psi )	Rm-norme (psi)	% Diff.
Gr. 2	37 000	8 318	0,0775	107 324	75 000	+30,1%
Gr. 5	49 360	11 096	0,0775	143 176	120 000	+16,2%
Gr. 8	61 000	13 713	0,0775	176 939	150 000	+15,2%

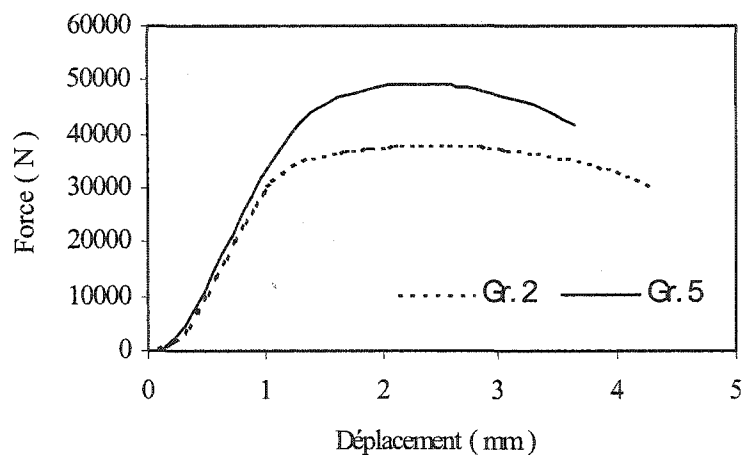


Figure 22 Courbes des essais de traction – boulons de qualité ordinaire

Tableau VI

Résultats des essais de traction – qualité supérieure

	Force ( N )	Force ( lb )	Section (In <sup>2</sup> )	Rm mesuré ( psi )	Rm-norme (psi)	% Diff.
Gr. 2	33 620	7 558	0,0775	97 520	75 000	+23,1%
Gr. 5	47 000	10 566	0,0775	136 330	120 000	+12,0%
Gr. 8	57 500	12 926	0,0775	166 787	150 000	+10,1%

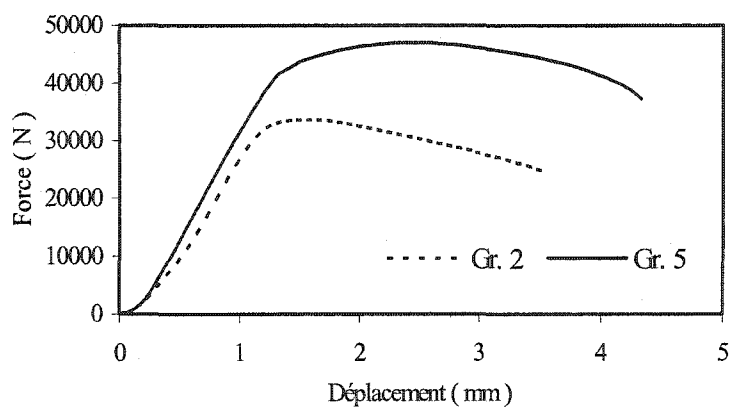


Figure 23 Courbes des essais de traction – boulons de qualité supérieure



## 2.6 Validation des résultats

Les valeurs de dureté mesurées ont été converties en dureté Brinell pour pouvoir les comparer avec celle de la norme. On note que les écarts présentés dans les tableaux (voir annexe 3) sont calculés à partir de la valeur mesurée et de la valeur moyenne indiquée par la norme.

### 2.6.1 Comparaison des résultats

#### Pour les écrous

Pour les écrous de qualité ordinaire, la figure 24 présente une idée sur la correspondance entre les valeurs mesurées et celles de la norme SAE. On remarque que pour ce cas, les valeurs de dureté normalisée se chevauchent, ce qui laisse entrevoir un problème d'identification et de caractérisation possible selon la norme. Toutefois les valeurs mesurées sont séparables au moins pour les grades 2 et 8.

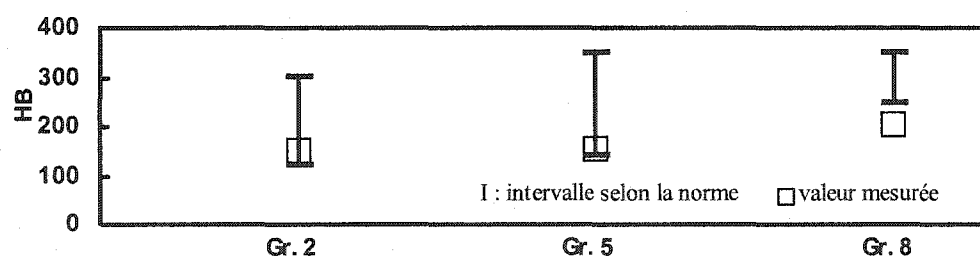


Figure 24 Comparaison des mesures de dureté – écrous de qualité ordinaire

La figure 25 donne une idée sur la correspondance entre les valeurs mesurées avec celles de la norme SAE pour le cas des écrous de qualité supérieure. À cause du chevauchement des intervalles de dureté pour les différents grades, on peut donc conclure que la mesure de dureté ne permet pas de faire une identification du grade.

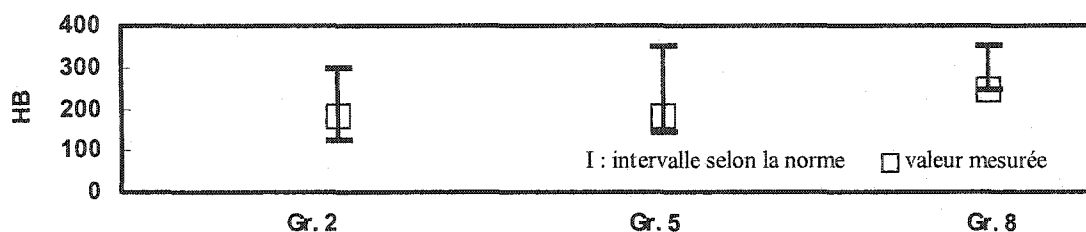


Figure 25 Comparaison des mesures de dureté - écrous de qualité supérieure

### Pour les vis et tiges filetées

Dans le cas des vis et tiges filetées de qualité ordinaire, les résultats obtenus sont détaillés à l'annexe 3. La figure 26 montre les valeurs mesurées par rapport à la norme, le Tableau VII donne l'écart de la valeur de la résistance calculée par rapport à celle de la norme. On remarque que les écarts sont très réduits, sauf pour le grade 2, qui avait environ le même écart lors de l'essai de traction, ce qui montre que cette vis a des propriétés mécaniques très supérieures à celles de la norme.

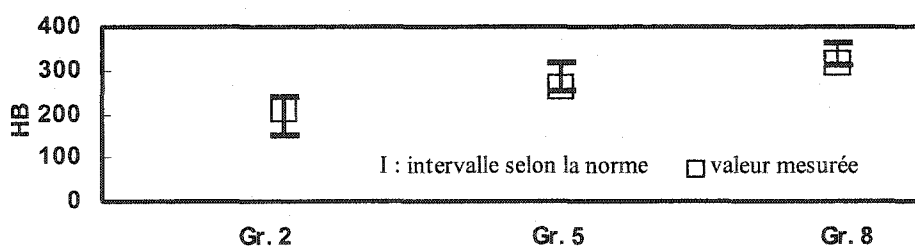


Figure 26 Comparaison des mesures de dureté – qualité ordinaire

Tableau VII

Comparaison des valeurs de la résistance – qualité ordinaire

	Résistance ( ksi )		% Ecart
	Calculé *	Norme	
Gr. 8	157,50	150,00	+ 4,8 %
Gr. 5	131,00	120,00	+ 8,4 %
Gr. 2	105,67	75,00	+ 29,0 %

Maintenant, dans le cas des vis et les tiges filetées de qualité supérieure, les résultats des analyses sont également donnés à l'annexe 3 et résumés à la figure 27. De plus, le tableau VIII donne l'écart de la valeur de la résistance calculée par rapport à celle de la norme. On remarque encore une fois que les écarts sont très réduits, sauf pour le grade 2.

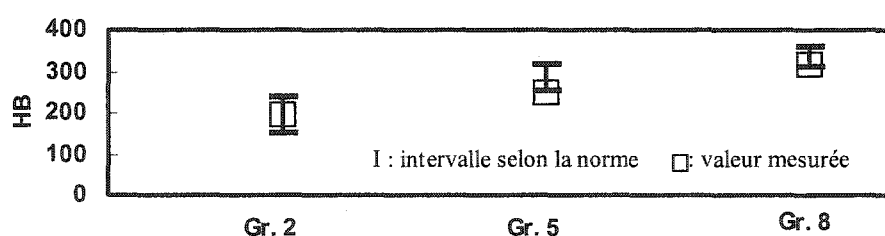


Figure 27 Comparaison des mesures de dureté – qualité supérieure

Tableau VIII

Comparaison des valeurs de la résistance – qualité supérieure<sup>1</sup>

	Résistance ( ksi )		% Ecart
	Calculé *	Norme	
<b>G r. 8</b>	158,50	150,00	+5,4%
<b>G r. 5</b>	124,33	120,00	+3,5%
<b>G r. 2</b>	96,33	75,00	+22,1%

Les résultats obtenus pour les vis et tiges filetées nous permettant de conclure que nous pouvons nous baser sur des mesures de dureté pour faire l'identification des grades. Cette conclusion constitue le principe de base de la conception de l'appareil d'identification, présenté au chapitre suivant.



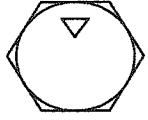
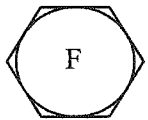

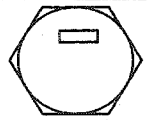
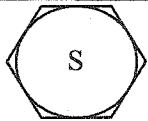

### 2.6.2 Validation avec différents lots de boulonnerie de TransÉnergie

Lors de notre visite au poste de Saint-Césaire du 11 novembre 2002, nous avons récupéré quelques échantillons de différents lots de vis et tiges filetées sur lesquels nous avons effectué des mesures de dureté normalisées. Celles-ci nous ont permis de comparer les valeurs de la résistance calculée avec celles de la norme (voir tableau IX). Ainsi, nous avons trouvé des écarts qui ne dépassent pas 15%, autrement dit une identification du grade assez précise.

<sup>1</sup> Les valeurs de la résistance sont calculées à partir de la mesure de dureté avec la relation (2.1)

Tableau IX

Résultats des mesures de dureté des boulons de TransÉnergie<sup>1</sup>

	Marquage	Dureté HB		Résistance		% Écart - R <sub>m</sub>
		Mesuré - Moy.	écart type	*Calculé - Ksi	Norme - Ksi	
Vis ( Grade 5 -Classe 8,8 )		247	14.01	125.18	120.00	<u>+4.4%</u>
		239	4.58	121.29	120.35	<u>+0.8%</u>
Vis ( Grade 2 - Classe 5,8 )		171	8.54	86.78	75.00	<u>+13.5%</u>
		173	3.06	87.63	75.00	<u>+14.4%</u>
		158	1.73	80.19	75.00	<u>+6.4%</u>
		163	3.51	82.55	75.00	<u>+9.1%</u>
		152	3.46	77.14	75.00	<u>+2.7%</u>
Tiges filetées- Gr.2		150	3.00	76.13	75.00	<u>+1.4%</u>

<sup>1</sup> Les valeurs de la résistance sont calculées avec la relation (2.1)

### 2.6.3 Validation de la relation d'équivalence dureté et résistance

Afin de comparer l'exactitude du rapport de la résistance mécanique par la dureté indiqué dans la littérature et utilisé auparavant, nous avons calculé ce rapport pour les deux lots de vis. Les tableaux X et XI présentent à l'aide des mesures expérimentales de dureté et de traction. Le tableau XII donne les valeurs moyennes du même rapport entre les deux lots. Les résultats trouvés représentent une validation de l'hypothèse qui a été adoptée.

Tableau X

Calcul de la relation dureté vs résistance – qualité ordinaire

	HB (mesuré)	Rm (mesuré - psi)	Rm (psi) / HB	Rm (mesuré - MPa)	Rm (MPa) / HB
Gr. 8	315	176 939	562	1 220	3,87
Gr. 5	262	143 176	546	987	3,77
Gr. 2	211	107 324	509	740	3,51

Tableau XI

Calcul de la relation dureté vs résistance – qualité supérieure

	HB (mesuré)	Rm (mesuré - psi)	Rm (psi) / HB	Rm (mesuré - MPa)	Rm (MPa) / HB
Gr. 8	317	166 787	526	1 150	3,63
Gr. 5	249	136 330	548	940	3,77
Gr. 2	193	97 520	505	672	3,48

Tableau XII

Valeurs moyennes de Rm/HB pour les deux lots de boulons

	Rm (psi) / HB	Rm (MPa) / HB	Matériau
Gr. 8	544	3.75	AISI 4140
Gr. 5	547	3.77	AISI 4140
Gr. 2	507	3.50	AISI 1040

## 2.7 Conclusion

Selon les essais effectués, la relation d'équivalence «dureté vs résistance» est assez précise pour un même type d'acier (exemple : l'acier AISI 1040 [Grade 2],  $R_m(\text{MPa})/\text{HB}=3,5$ ;  $R_m(\text{psi})/\text{HB} = 510$ ), ce qui nous permet d'affirmer que les résultats des essais de dureté normalisés (essais effectués avec l'appareil de dureté ROCKWELL) donnent une indication assez satisfaisante sur le grade des vis et des tiges filetées, ces derniers sont très utilisés par notre client. Pour les prochaines étapes du projet, nous avons pris cette direction pour exploiter ces résultats. Toutefois, nous tenons à signaler que malheureusement l'identification n'est pas applicable pour les écrous et que la précision de la relation dureté versus résistance est très bonne (environ 7%). Pour d'autres applications qui exigent un niveau de précision plus élevé, il sera nécessaire de tenir compte de l'imprécision induite par la conversion de la mesure de dureté en valeur de résistance. Dans le cas de notre application, pour l'identification des grades des boulons, il existe un écart assez important entre les valeurs de résistance normalisées (75 ksi pour Gr. 2, 120 ksi pour Gr. 5). Ainsi, même avec une erreur de 15%, il est possible de trouver le bon grade. Il faut également prêter une attention particulière à la qualité des mesures de dureté pour ne pas causer d'autres sources d'erreurs qui peuvent fausser les résultats.

## CHAPITRE 3

### CONCEPTION ET ÉTUDE DE L'APPAREIL DE L'IDENTIFICATION

#### 3.1 Introduction

Au début de ce chapitre, nous allons nous intéresser à l'étude et au choix des paramètres de conception, qui sont essentiellement le diamètre de la bille et la charge à appliquer. En effet, plus le diamètre de la bille utilisée est petit, moins la charge à appliquer est importante (pour les aciers,  $F = 30D^2$ ). Cette relation va servir à la conception d'un appareil d'identification par la mesure de la dureté utilisant une charge moindre que celle utilisée dans un appareil de dureté Brinell normalisé. Cet appareil serait utilisé par le personnel technique dans les postes d'Hydro-Québec. La lecture de l'empreinte sera étudiée dans le chapitre suivant.

#### 3.2 Choix des paramètres de conception

La première étape dans le choix des paramètres de conception est la vérification et la validation de la relation qui existe entre la force et le diamètre de la bille afin voir l'importance du respect de cette dernière.

##### 3.2.1 Vérification de la relation $F = aD^2$ (première approche)

La norme internationale ISO 6506 -1981 (ou ASTM E10) qui traite des essais de dureté Brinell pour les matériaux métalliques spécifie un rapport  $F/D^2 = a$ , ( $a$  étant une constante qui dépend du matériau et qui correspond à la charge appliquée divisée par le



carré du diamètre de bille utilisée). Nous rappelons que la relation utilisée par J. Datsko et al. (2001) donne :

$$\frac{F}{D^2} = K_d \cdot \left(\frac{d}{D}\right)^{n+2} \quad (3.1)$$

D'après cette formule, il faut maintenir le rapport  $F/D^2$  constant. A l'origine, la norme avait prévu que  $F$ , exprimée en kilogrammes-force, serait égale à  $30D^2$  pour les aciers, soit  $F = 3000\text{kgf}$  pour une bille de 10 mm de diamètre et  $750\text{kgf}$  pour une bille de 5 mm (voir figure 28). La modification du système d'unités a perturbé le rapport simple et maintenant, au lieu de 3000 kgf, la force  $F$  est devenue :

$$\frac{3000}{0,102} \approx 29400N$$

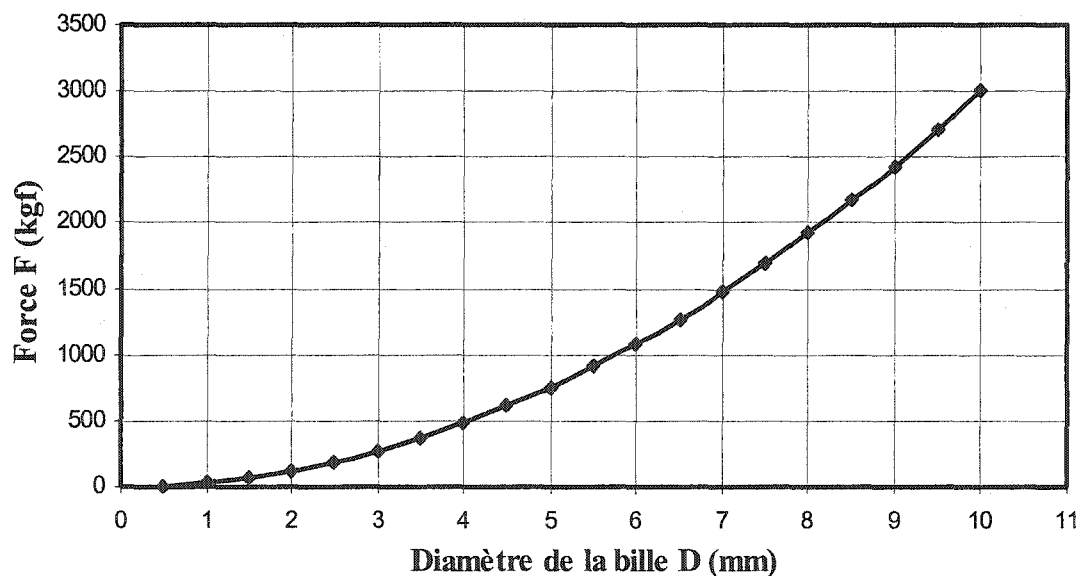


Figure 28 Graphique de la relation  $F=30D^2$  (Norme ASTM – E10)

J. Datsko (2001) présentait une méthode d'estimation de la résistance à la rupture  $R_m$  à partir de mesures de dureté. Pour cela, il utilisait la relation de Meyer afin d'aboutir aux résultats présentés au chapitre 1. La norme quant à elle recommande des valeurs du rapport  $F/D^2$  spécifiques selon les matériaux. Pour les aciers, elle spécifie  $F/D^2 = 30$ , pour l'aluminium, un rapport de 5, pour le plomb et l'étain un rapport de 1, etc. (d'après E. Brandes et al. (1992)). Nous souhaitons montrer ici que les deux formules, celle donnée par la norme et l'autre par Meyer, sont en fait équivalentes et donnent les mêmes résultats. Pour cela, il suffit de montrer que :

$$K_d \cdot \left( \frac{d}{D} \right)^{n+2} = a = \frac{F}{D^2}$$

Dans l'article de J. Datsko (2001), de nombreux matériaux ont été testés et les constantes  $K_d$  correspondantes à chacun d'eux ont été déterminées. Il nous faut alors connaître le diamètre de l'empreinte obtenue suite aux tests de dureté et le coefficient d'écroutissage  $n$ . Le diamètre de l'empreinte s'obtient à partir de la dureté HB du matériau (E. Oberg et al. (2000)) avec la relation classique (1.1). À partir de cette formule, nous avons élaboré des tables qui, pour une bille de diamètre 10 mm et sous une charge de 3000 kgf, nous donnent la valeur du diamètre de l'empreinte  $d$ . Enfin, le coefficient d'écroutissage est propre à chaque matériau et il faut donc chercher dans la littérature les valeurs pour chacun d'eux. De plus, il fallait que nous trouvions toutes ces informations pour les matériaux testés dans les travaux de J. Datsko (2001) et dont nous connaissions la valeur de  $K_d$ , ce qui nous a alors permis de faire les calculs de vérification de la relation  $F = 30D^2$ .

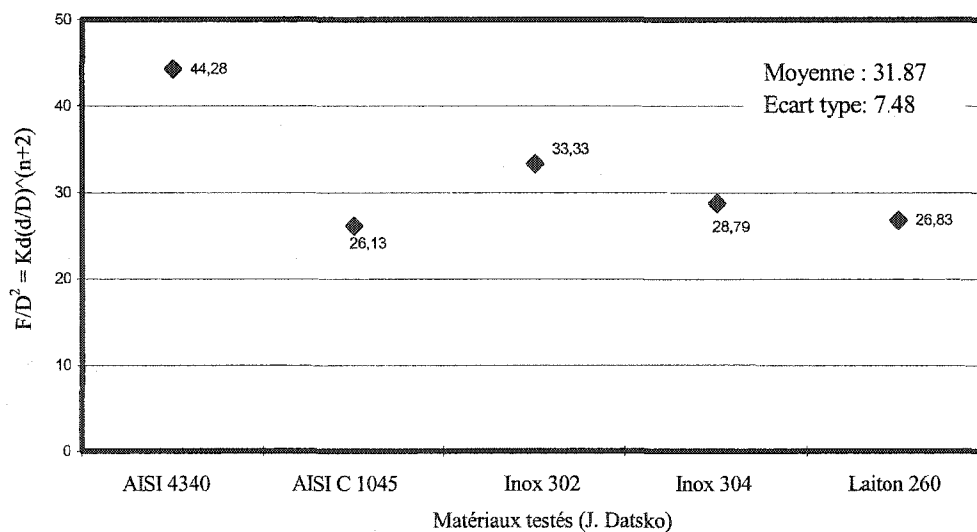
Nous avons trouvé les valeurs de coefficient d'écroutissage dans deux références Bailey, John A. et al. (2000) et Schey, John A. (2000), mais cela ne nous a pas permis de couvrir l'ensemble des matériaux testés dans l'article de J. Datsko (2001). Nous n'avons donc pu effectuer des calculs que pour certains matériaux. Tous les résultats sont reportés

dans le tableau XIII. Des courbes ont également été tracées, l'une pour vérifier la relation  $F/D^2 = 30$  (pour les aciers, figure 29) et l'autre pour  $F/D^2 = 5$  (pour l'aluminium, figure 30).

Tableau XIII

Calculs de vérification de la relation  $F = a.D^2$

Matériau	Indice n	Constante $K_d$	Dureté HB	Empreinte d	$\frac{F}{D^2} = K_d \cdot \left(\frac{d}{D}\right)^{(n+2)}$	$\frac{F}{D^2}$	Écart (%)
Acier : AISI 4340	0,15	3011,38	217	4,1	44,28	30	32,26 %
Acier : AISI C1045	0,12	1730,22	218	4,1	26,13	30	-14,79 %
Acier : Inox 302	0,3	1802,7	155	4,8	33,33	30	9,98 %
Acier : Inox 304	0,45	1653,03	150	4,9	28,79	30	-4,20 %
Laiton 260	0,41	771,95	80	6,45	26,83	30	-11,81 %
AL 1100-0	0,25	256,34	23	5,07	5,56	5	10,07 %
AL 6061-T6, T651	0,05	837,68	95	2,57	5,17	5	3,28 %

Figure 29 Vérification de la relation  $F = 30D^2$

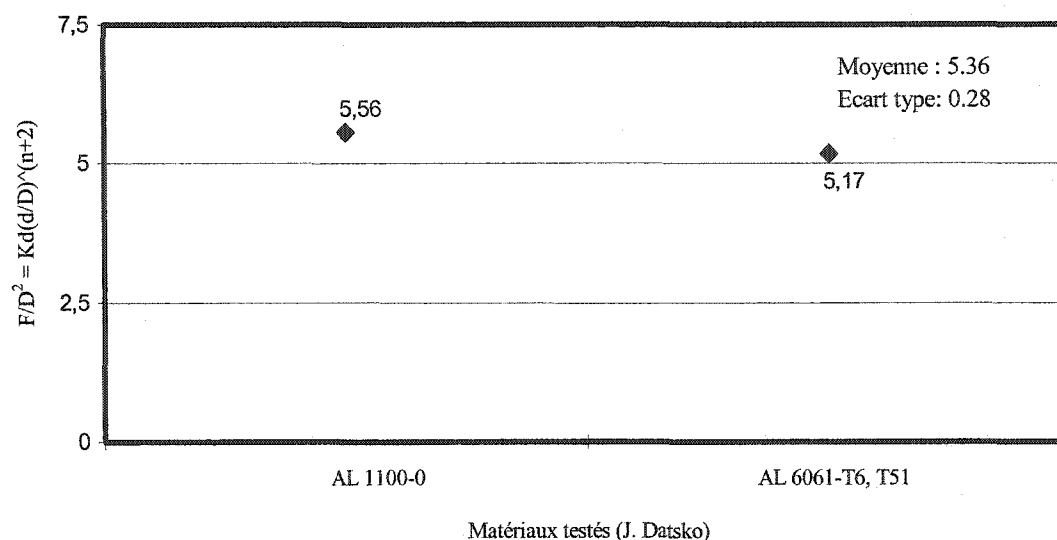


Figure 30 Vérification de la relation  $F = 5D^2$

Dans le cas de la relation  $F/D^2 = 30$ , nous remarquons que les points se situent autour de la valeur 30, sans grande précision toutefois. La relation  $F/D^2 = 5$  est mieux respectée mais les calculs ne concernent que deux matériaux. La norme s'est en fait basée sur l'expérience pour déterminer les lois  $F = aD^2$  et il nous aurait donc fallu effectuer un très grand nombre d'essais pour arriver à démontrer la cohérence des deux méthodes. De plus, nous utilisons ici les résultats de J. Datsko (2001), notamment  $K_d$ , qui ont été obtenus par l'expérience et ne proviennent d'aucune formule exacte. Ceci a donc pu induire dans nos calculs des erreurs, qui donnent des résultats plus ou moins fiables.

Ces résultats semblent indiquer que la relation  $F = aD^2$  provient effectivement de la relation de Meyer. Nous constatons aussi que les différentes méthodes appliquées dans les mesures de dureté, que ce soit pour estimer  $R_m$  ou pas, se recoupent et découlent toutes de la même théorie, à savoir initialement de la relation de Meyer.

La relation spécifiée par la norme est toutefois plus pratique à appliquer que la relation de Meyer puisqu'elle ne met en jeu que la force à appliquer et le diamètre de la bille utilisée. Pour notre application, elle vaut environ  $F = 30D^2$ . Les essais que nous avons réalisés montrent bien que cette relation doit être respectée pour obtenir des résultats fiables pour les valeurs de dureté.

Remarque :

En vue de la conception d'un appareil de mesure de dureté, il faut que l'on trouve un compromis entre la force appliquée et la taille de l'empreinte. Si nous choisissons une grosse bille, il faudra que l'on soit capable d'appliquer une force égale à  $30D^2$ , ce qui peut devenir difficile. Inversement, si l'on choisit de réduire la force, une bille de petit diamètre doit être choisie mais nous pouvons alors avoir quelques difficultés pour mesurer l'empreinte avec des moyens optiques conventionnels (exemple : comparateur optique). Les courbes de la figure 31 présentent pour chaque diamètre de bille l'intervalle « delta » dans lequel on fait la différence entre grade 2 et grade 8. Ces intervalles sont très faibles, ce qui confirme la nécessité de trouver un bon compromis entre la force appliquée  $F$  et le diamètre de bille  $D$  (voir figure 32).

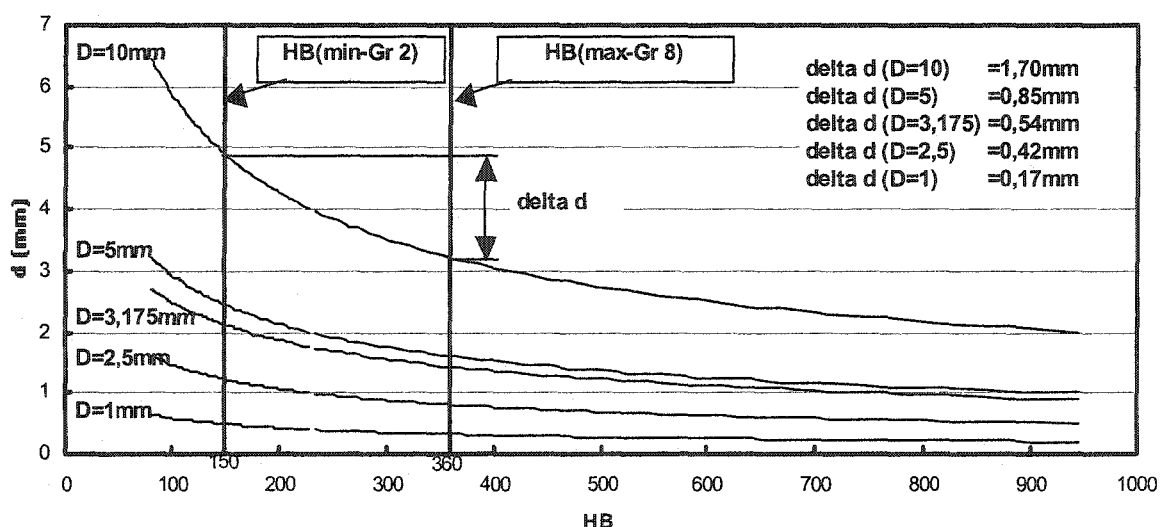


Figure 31 Variation de l'intervalle delta en fonction du diamètre de la bille D

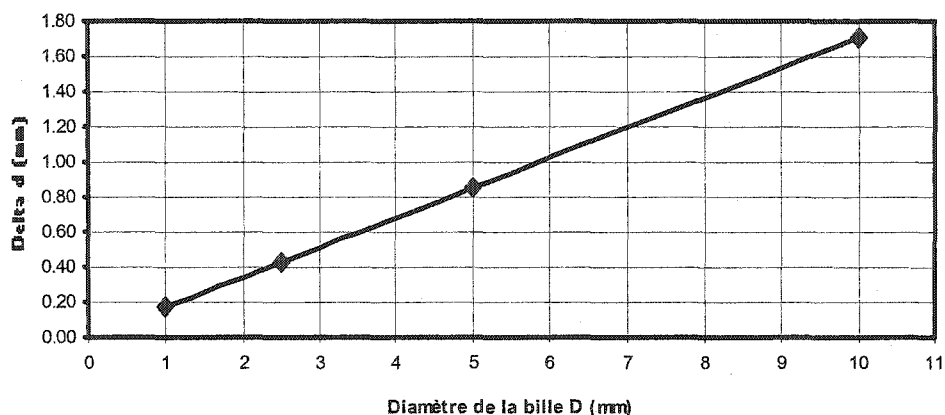


Figure 32 Écart des diamètres des empreintes entre grade 2 et 8 en fonction de D

### 3.2.2 Influence du coefficient $a$ ( $F = aD^2$ ) (deuxième approche)

Nous avons déjà vu et démontré dans les étapes précédentes que, d'après la norme, la valeur de la force  $F$  recommandée lors d'un essai de dureté réalisé avec un pénétrateur de forme sphérique sur les aciers a pour valeur  $F=30D^2$ . Or en étudiant l'influence du coefficient ( $a$ ) sur les différences des diamètres des empreintes entre les différents grades, on trouve que ce coefficient a un optimum pour lequel on trouve les différences des diamètres les plus marquantes. Par la suite nous avons dressé un autre graphique (voir figure 33) qui contient deux groupes de courbes, le premier représente la différence entre les diamètres des empreintes des grades 2 et 5 et celle des grades 5 et 8. Ces dernières courbes sont croissantes pour tout ( $a$ ), sauf que ces courbes ont une forte croissance au début et par la suite cette croissance est beaucoup moins prononcée. Le deuxième groupe représente les courbes des dérivés selon ( $a$ ), ce qui montre le degré de croissance des courbes  $\{\Delta d\}$ , sur cette figure on voit que les courbes  $\{d(\Delta d)/da\}$ , ont un même point d'inflexion à  $a = 50$ , pour le quel on obtient une grande différence entre les diamètres des empreintes et autrement dit une meilleure visibilité. Notons que au-delà de  $a = 30$  on obtient une plus grande différence, mais cette différence est trop faible.

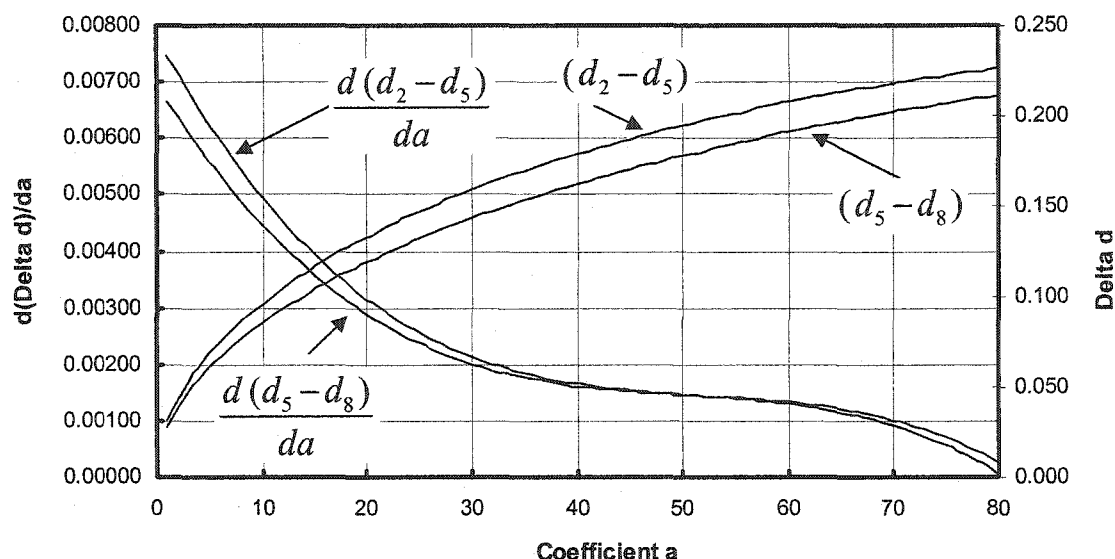


Figure 33 Influence du coefficient "a" sur l'identification des empreintes<sup>1</sup>

### 3.2.3 Simulation de l'essai de dureté Brinell

Nous avons procédé à des essais expérimentaux qui ont montrés qu'il est indispensable que la relation reliant la force au diamètre de la bille, soit vérifiée pour obtenir de bons résultats, à savoir dans le cadre de notre projet, la possibilité d'identifier visuellement les grades des matériaux testés.

Le diamètre de la bille utilisée dans ces essais est de 3,175 mm, il a fallu donc que nous appliquions une force équivalente à  $F = 30D^2$  soit environ 302 kg ou 2967 N. Nous avons utilisé un montage expérimental comprenant une cellule de charge et un système d'acquisition de la charge appliquée sur l'échantillon (voir figure 34). Nous avons disposé nos échantillons sur la cellule de charge qui est reliée au système d'acquisition.

<sup>1</sup>  $d_i$  : diamètre de l'empreinte pour le grade i

Nous avons donc ensuite simulé l'indentation sphérique de type Brinell en vérifiant sur l'écran la valeur de la force appliquée.

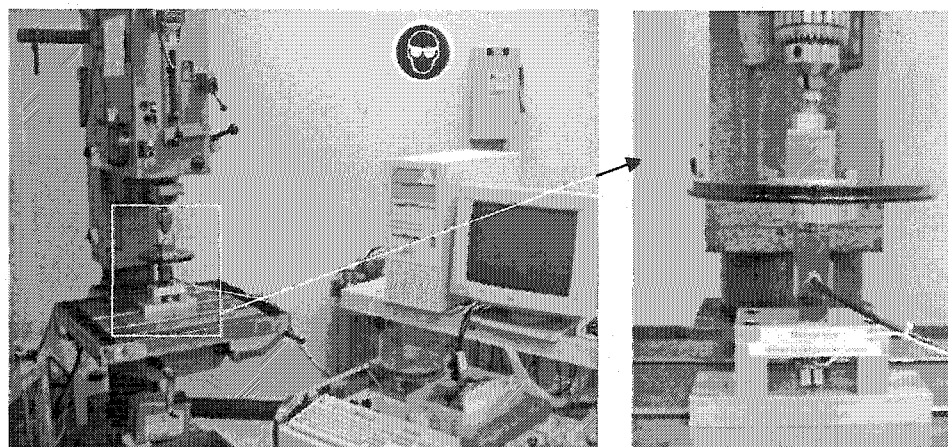


Figure 34 Montage utilisé pour la simulation de l'essai de dureté Brinell

Les résultats obtenus sont compilés dans le tableau XIV. Nous constatons immédiatement que les résultats trouvés sont cohérents avec les valeurs de dureté obtenues pour les mêmes matériaux lors de la première phase du projet. En effet, les écarts obtenus sont très faibles et sous les 7%.

Tableau XIV

Résultats des essais avec charge de 300 kg

	Force (N)	d(pouce)	HB(D=1/8")	HB(D=1/8") Moy.	Écart type	HB(converti de Rockwell HRA)	Écart	Écart par mesure effectuée
Gr. 2	3005	0,055	189,8	189,5	1,14	193	-1,87%	-1,70%
	2980	0,055	188,2					-2,56%
	3015	0,055	190,4					-1,37%
Gr. 5	3020	0,047	265,1	264,7	8,60	249	+5,93%	+6,07%
	2975	0,046	273,1					+3,07%
	2980	0,048	255,9					+2,70%
Gr. 8	2980	0,043	322,2	328,7	6,77	317	+3,56%	+1,62%
	3035	0,043	328,2					+3,40%
	3030	0,042	335,7					+5,58%



En vue de la conception de l'appareil de mesure, le respect de la relation  $F = 30D^2$  devient pour nous un critère nécessaire à respecter afin d'obtenir des valeurs de dureté cohérentes des matériaux testés. À l'œil, sur ces échantillons, nous arrivons à différencier les grades, notamment grâce à la présence ou non de bourrelets autour des empreintes (pour les boulons de grade 2).

### 3.2.4 Choix final de la force et du diamètre de la bille

Les essais que nous avons réalisés nous ont permis de vérifier le principal critère de conception à respecter, à savoir la relation  $F = 30D^2$  et la relation « dureté vs résistance à la rupture ». La figure 35 montre encore une fois l'intérêt de respecter la relation reliant la force au diamètre de la bille, puisque nous voyons qu'on a presque le meilleur écart entre les diamètres des empreintes pour un diamètre de la bille de 3,175mm. En plus, les simulations de l'essai de dureté Brinell ont permis de voir la possibilité de faire une distinction visuelle entre des empreintes sur des boulons de grade 2, 5 et 8, avec un bon compromis entre la force et le diamètre de la bille.

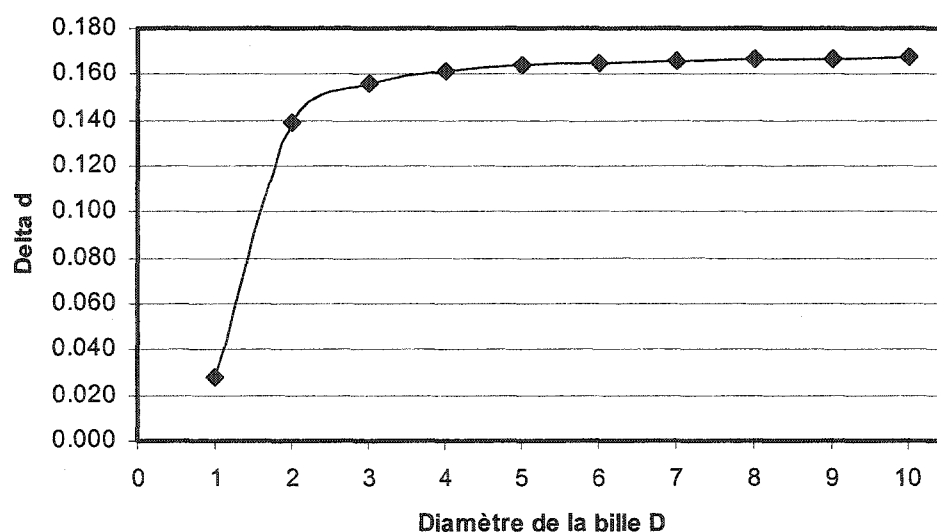


Figure 35 Delta\_d (Gr.2 & Gr.5) versus le diamètre D, F=300 kgf

### 3.3 Recherche d'idées de conception

A la suite des essais qui nous ont permis de valider la relation  $F = 30D^2$ , le diamètre du pénétrateur et la charge à appliquer sur l'échantillon ont été respectivement fixés à 1/8" et à 300kg. Ce diamètre du pénétrateur donne en effet un bon compromis entre une bonne lisibilité des empreintes et une charge à appliquer pas trop importante. Si une bille de 10 mm avait été utilisée, la charge à appliquer sur l'échantillon aurait été de 3 tonnes, ce qui aurait demandé de concevoir une machine du même type que les machines Brinell existantes, à savoir un appareil imposant et très coûteux.

#### 3.3.1 Système d'application de la force par volant

Nous avons donc cherché des solutions de conception pour l'appareil d'identification des éléments filetés. Utilisant la dureté pour effectuer la caractérisation, la conception portera donc sur un appareil de dureté. Notre première idée de conception a été un appareil équipé d'un système de volant et de vis (voir figure 36).

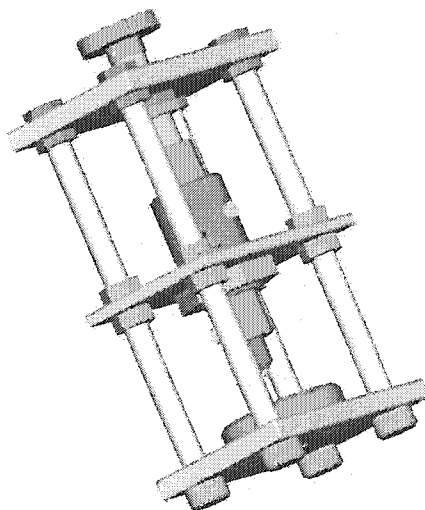


Figure 36 Première idée de conception, système de volant/vis

Le fonctionnement est le suivant : l'opérateur dépose l'échantillon sur le porte-pièce situé au bas de l'appareil. Il tourne ensuite le volant qui permet de translater verticalement le pénétrateur. En effet, au moyen d'une rainure, la vis transforme le mouvement de rotation en translation, ce qui permet d'effectuer la mesure de dureté sur le matériau à tester. Les tiges filetées placées aux quatre coins de l'appareil assurent la rigidité de l'appareil. Ce prototype serait à équiper d'un limiteur de couple, ceci afin d'appliquer à chaque essai le même couple et d'assurer la bonne répétabilité des mesures. Le système de limiteur de couple est en effet indispensable pour effectuer les essais de dureté et pour s'assurer de l'obtention de bons résultats donc de bonnes empreintes permettant l'identification des grades.

Le système de vis/volant a été rejeté par la suite. En effet, nous considérons qu'un système d'application d'un couple est moins adapté qu'une application directe d'une force sur l'échantillon. En fait, un appareil équipé d'un système de levier pour appliquer la charge semble être beaucoup plus pratique et surtout plus naturel pour l'opérateur effectuant l'essai de dureté. De plus, un tel principe est plus proche de l'essai de dureté normalisé que ne l'est le système de vis/volant du prototype présenté jusqu'à présent. Cette première solution a donc été rejetée.

### **3.3.2 Système de pince**

Une autre solution serait d'utiliser un système de pince (figure 37).

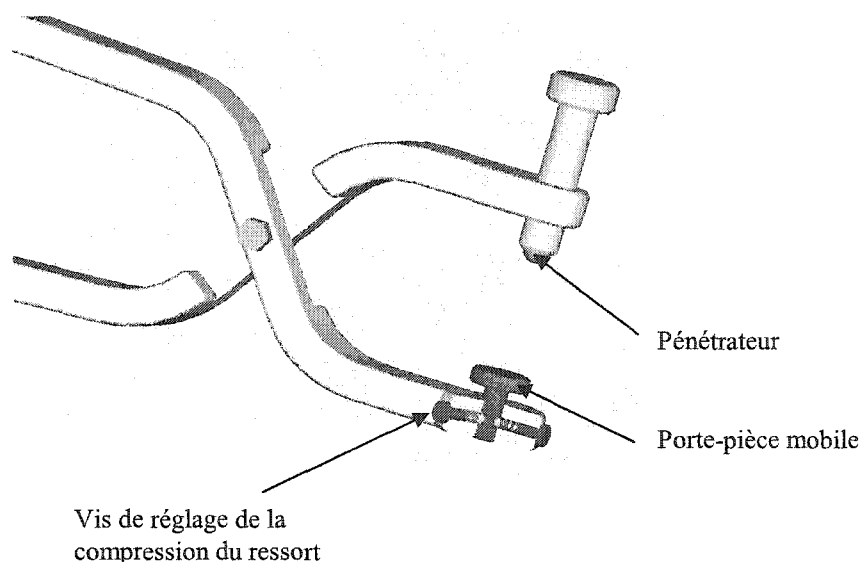


Figure 37 Système de pince

Cet appareil doit utiliser un système de limiteur de force et fonctionnerait selon le principe de désengagement de la bille à une valeur de force donnée. Ainsi, lorsque l'empreinte est effectuée sur l'échantillon pour une charge de 300kg, la bille se désengage et la partie mobile translate vers le bas. Le réglage des 3 ressorts permettrait de fixer cette valeur de charge. Le réglage serait un réglage extérieur et effectué pour chaque ressort à l'aide d'une vis.

Dans cette solution le réglage serait un réglage extérieur et effectué pour chaque ressort à l'aide d'une vis, ce qui peut s'avérer difficile lors du calibrage de l'appareil. Les ressorts devraient avoir la même précharge ce qui nécessite un réglage simultané identique pour tous les ressorts. De plus, il faudrait prévoir un important bras de levier pour appliquer une force de 300 kgf. Ainsi, cette idée de conception a été donc abandonnée.

### 3.3.3 Système d'application de la force par levier

La troisième solution utilise un levier pour appliquer la charge sur l'échantillon (voir figure 38). Pour limiter la force, au lieu de prévoir un réglage extérieur et propre à chaque ressort, nous avons pensé à un réglage intérieur et simultané des ressorts de l'appareil qui faciliterait grandement la phase de calibrage et d'essais du prototype. Nous nous sommes donc intéressés plus particulièrement à cette solution de conception. Nous avons commencé par concevoir le système de réglage intérieur. Il s'agit d'un cône avec lequel les extrémités des ressorts sont en contact et qui agit, au moyen d'une vis de réglage en hauteur de celui-ci, sur la précharge des ressorts horizontaux (voir figure 39).

L'appareil avec levier est simple d'utilisation, l'opérateur manipule le levier pour effectuer l'empreinte sur l'échantillon déposé sur le limiteur de force équipé d'une vis de réglage de mise en position. Ce système d'application de la charge constitue un moyen pratique et plus naturel pour effectuer l'essai de dureté par rapport aux solutions précédentes. C'est pour ces différentes raisons que cette dernière solution a été retenue.

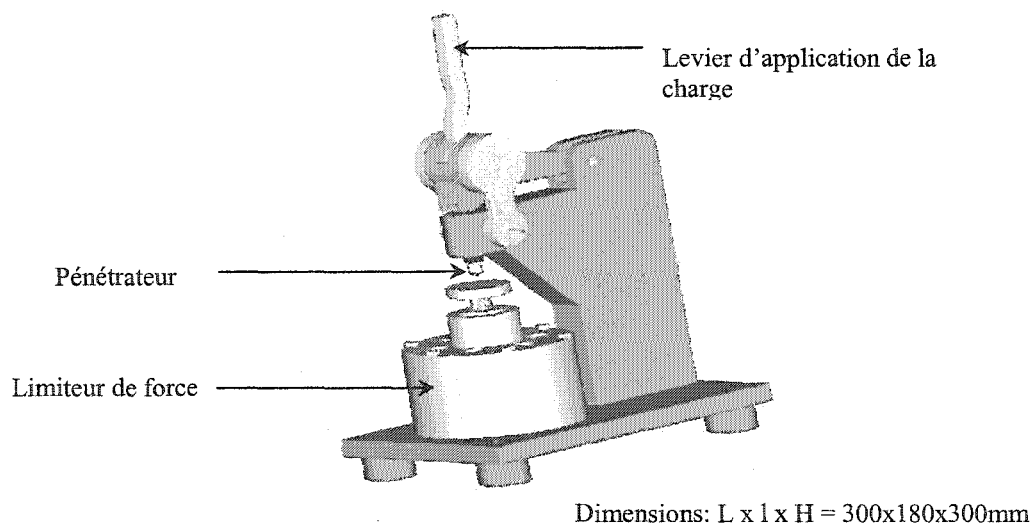


Figure 38 Proposition de prototype final

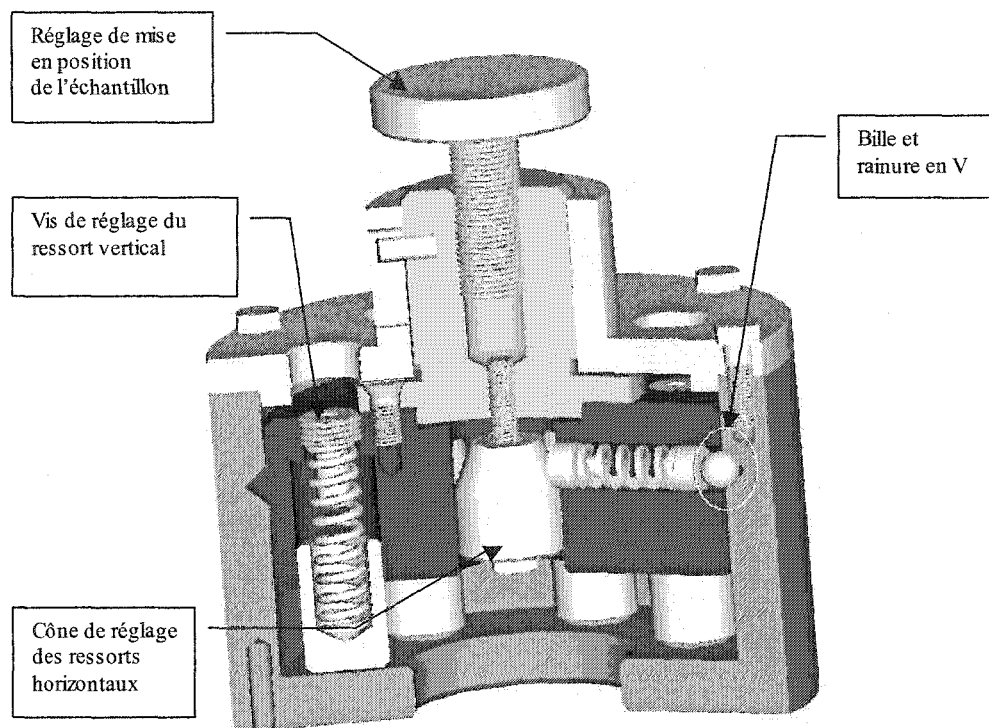


Figure 39 Système : limiteur de force (version finale)

### 3.4 Description de la solution retenue

Le prototype a des dimensions globales de 30 x 30 x 17,5 cm (H x L x l). On trouve sur celui-ci un levier d'application de la charge, le pénétrateur de 3.175mm et un élément que nous avons nommé « Limiteur de force ». Cet élément sera développé par la suite et sa conception sera plus amplement détaillée. Il est intégré à l'appareil global car il permet l'application à chaque essai d'une force de valeur constante et prédéterminée. Le levier développe à la sortie une course d'environ 14 mm. Le système, entièrement en acier, peut être fixé sur un établi dans un atelier. Ces caractéristiques et les nombreuses possibilités de réglage existantes sur le limiteur de force ne s'appliquent strictement qu'au prototype. Le produit final devrait être fabriqué en série et ne présentera que quelques possibilités de calibrage, ceci afin d'éviter un dérèglement éventuel dû aux

actions des opérateurs sur la machine. Nous allons à présent développer la démarche de conception concernant le limiteur de force, élément principal du prototype.

### 3.5 Conception et modélisation du limiteur de force

Nous avons pensé au principe de limiteur de force à déclenchement mécanique. Le principe de fonctionnement de ce composant serait de provoquer le déclenchement d'un plateau à une valeur donnée de la charge appliquée, ce qui permettrait à l'utilisateur de savoir que la charge maximale est atteinte et que l'empreinte a été effectuée sur le matériau.

Comme le montre la figure 39, le limiteur serait composé d'une rainure en V qui constituerait le logement d'une bille à l'équilibre. Cette bille serait reliée à un ressort qui la comprime contre la rainure. Lorsque l'utilisateur manipule le levier pour effectuer un essai de dureté, la charge appliquée sur la bille du limiteur de force augmente jusqu'à une valeur maximale pour laquelle la bille se sort de la rainure. Cette valeur maximale correspond à la force spécifiée par la norme dans le cadre des essais de dureté :  $F = 30D^2$ . Une fois que la bille est sortie de la rainure, l'empreinte a été effectuée sur le matériau. L'essai de dureté est terminé. Des ressorts verticaux permettent alors de faire remonter le plateau mobile du limiteur qui est à nouveau prêt à l'emploi.

#### 3.5.1 Conception du limiteur de force

Notre première idée de conception du limiteur propose 4 ressorts horizontaux et 4 verticaux. Le diamètre externe du limiteur de force obtenu est de 175 mm pour une hauteur maximale d'environ 178 mm. Or au cours de la modélisation qui sera présentée dans la suite de ce chapitre, il était indispensable de diminuer les longueurs des ressorts afin de diminuer les dimensions du limiteur. Une solution efficace pour diminuer le

diamètre du limiteur, était de fixer le nombre de ressorts horizontaux et verticaux à 6. Nous avons donc réussi à obtenir un diamètre de 134 mm au lieu de 175 mm, ce qui représente un gain de 40 mm. De même, la hauteur de l'appareil a été diminuée : la hauteur minimale est de 132 mm et la hauteur maximale de 160 mm environ (voir figure 40).

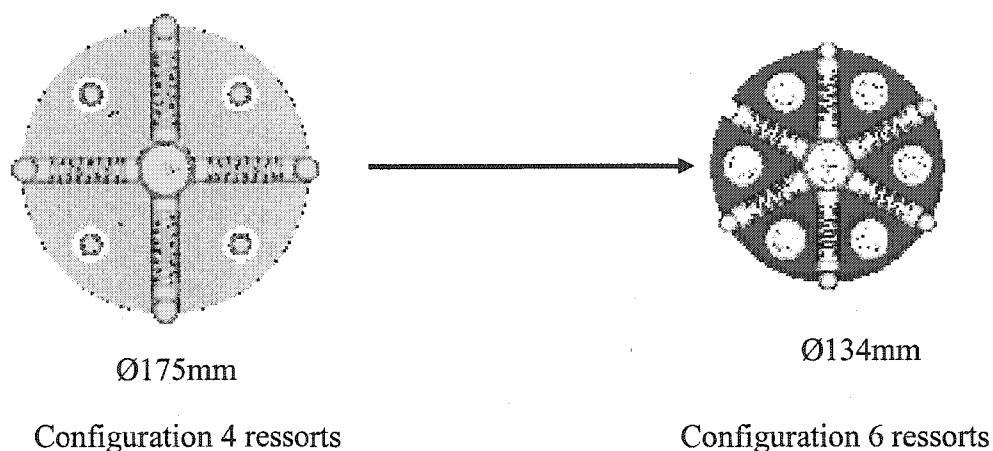


Figure 40 Réduction de diamètre du limiteur

### 3.5.2 Modélisation : approche du problème

Les dimensions du limiteur de force, et plus précisément des ressorts, régissent en fait les dimensions globales du système. Il est donc important de réaliser son dimensionnement. Afin d'y parvenir, nous avons réalisé la modélisation du principe du limiteur de force avec le logiciel de calcul MATLAB.

La programmation sous MATLAB a pris en compte de nombreux paramètres du problème et nous avons établi les hypothèses et bâti les équations nécessaires à la résolution dans le but de donner des dimensions optimales à l'ensemble des pièces du



limiteur de force. En effet, la principale contrainte du problème est de minimiser la taille de l'appareil de mesure de dureté.

Les résultats obtenus par la modélisation seront utilisés afin de réaliser la conception finale du prototype de limiteur de force avec le logiciel Pro/ENGINEER.

### 3.5.3 Démarche et hypothèses de modélisation

Différents essais de résolution du problème ont été effectués au cours du projet. La démarche expliquée ci-dessous ne montre que les résultats finaux obtenus et donne les valeurs fixées pour les différents paramètres du problème.

Initialement, seule la force maximale à atteindre pour effectuer l'essai de dureté est connue, à savoir la valeur de la force au moment où la bille est au dernier point de contact avec la rainure. Le diamètre de la bille du pénétrateur a été fixé à 1/8" soit 3.175mm. Ainsi la force maximale vaut :

$F = 30D^2 = 302.4kgf$  la modélisation va être effectuée pour une force maximale plus importante, soit :  $F = 360kgf$

À partir de cette valeur, nous avons tenté d'établir une méthode de résolution permettant d'établir la valeur des nombreuses variables du problème. Les différentes étapes sont présentées ci-après.

#### Position initiale

Le système est initialement au repos. Seule la charge due à la compression des ressorts est appliquée sur la bille placée dans la rainure. Elle est simplement en contact avec les deux parois de la rainure en V. Le bilan des forces est donné à la figure 41.

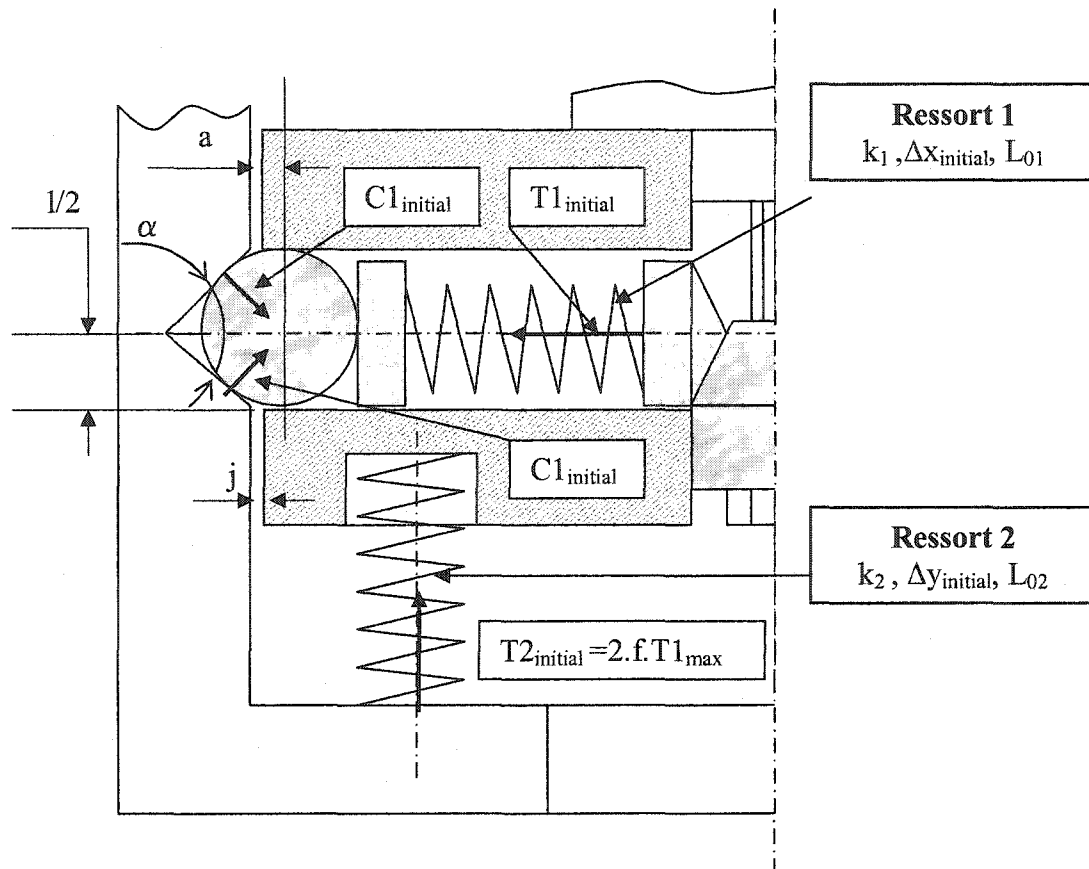


Figure 41 Position initiale de la bille

Les ressorts 1 (horizontal) et 2 (vertical) sont préchargés dans la position initiale. La déflexion initiale du ressort 1 due à la précharge est appelée  $\Delta x_{initial}$ . Elle sera calculée plus loin grâce à la relation classique  $F = k \cdot x$  des ressorts. Ainsi, nous aurons :  $\Delta x_{initial} = T1_{initial} / k_1$  avec  $T1_{initial}$  qui est la compression initiale du ressort préchargé. La déflexion initiale du ressort 2 sera calculée de la même façon.

La compression initiale du ressort 2 a été fixée à une valeur égale à  $T2_{initial} = 2 \cdot T1_{max} \cdot f$ , avec  $f$  qui est le coefficient de frottement. Nous en donnerons l'explication précise plus loin dans le rapport.

### **Position de la bille au dernier point de contact avec la rainure en V**

Lorsque l'utilisateur applique la force au moyen d'un levier, la bille commence à sortir de son logement, à savoir la rainure. Elle va alors atteindre une position particulière qui correspond au dernier point de contact avec la rainure. C'est à cette position précise de la bille que la charge appliquée pour l'essai de dureté est maximale et doit donc atteindre la valeur de 360 kg. C'est donc à cette position que l'empreinte est effectuée sur le matériau à tester.

Le but est donc d'accéder à la valeur de la compression du premier ressort pour continuer les calculs et déterminer les dimensions des deux types de ressorts utilisés dans le montage. Le bilan des forces nous permet de déterminer la compression du ressort au dernier point de contact. Le bilan des forces apparaît dans la figure 42.

Le bilan des forces est ici un peu plus complexe car il prend en compte la charge appliquée  $P$  et les frottements à considérer au cours du mouvement de la bille. Nous ne connaissons ici que la valeur de la charge  $P$ . Pour être capable d'aller plus loin dans les calculs, nous avons émis une hypothèse simplificatrice : la compression du deuxième ressort (vertical) en ce point serait égale à 20% de la valeur de la compression du premier ressort (horizontal). Cette hypothèse se justifie par le fait que la bille doit rester en contact avec la paroi de la rainure et ne doit en aucun cas perdre le contact. Il faut donc que la compression du ressort 1 permette le contact et que celle du ressort 2 ne soit pas trop grande face à cette dernière.

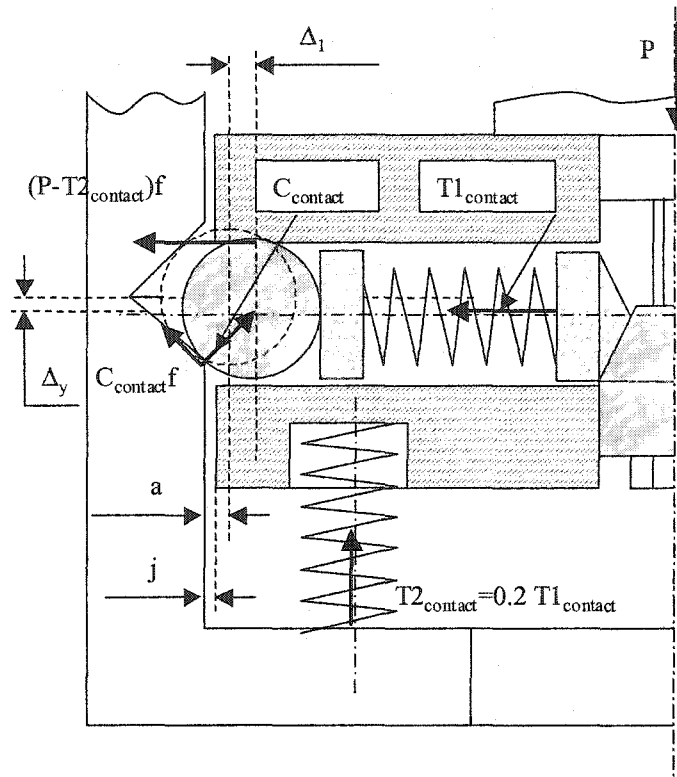


Figure 42 Position du dernier point de contact avec la rainure en V

Nous pouvons à présent effectuer le bilan des forces s'appliquant sur la bille. Nous tiendrons dorénavant compte que  $T2_{contact} = 0.2 \cdot T1_{contact}$  dans les calculs.

- Projection sur  $\vec{x}$

$$T1_{contact} + C_{contact} \cdot f \cdot \cos(\alpha/2) + (P - 0.2 \cdot T1_{contact}) = C_{contact} \cdot \sin(\alpha/2) \quad (3.2)$$

- Projection sur  $\vec{y}$

$$C_{contact} \cdot \cos(\alpha/2) + C_{contact} \cdot f \cdot \sin(\alpha/2) = (P - 0.2 \cdot T1_{contact}) \quad (3.3)$$

La projection sur  $\bar{y}$  donne alors directement  $C_{contact}$  en fonction de la charge appliquée et  $Tl_{contact}$ , ce qui élimine une variable du problème.

$$C_{contact} = \frac{(P - 0.2 \cdot Tl_{contact})}{\cos(\alpha/2) + f \cdot \sin(\alpha/2)} \quad (3.4)$$

Lorsqu'on utilise cette expression dans la relation (3.2), nous obtenons :

$$Tl_{contact} + \frac{(P - 0.2 \cdot Tl_{contact}) \cdot f \cdot \cos(\alpha/2)}{\cos(\alpha/2) + f \cdot \sin(\alpha/2)} + (P - 0.2 \cdot Tl_{contact}) = \frac{(P - 0.2 \cdot Tl_{contact}) \cdot \sin(\alpha/2)}{\cos(\alpha/2) + f \cdot \sin(\alpha/2)}$$

En posant :  $m = \frac{\sin(\alpha/2) - f \cdot \cos(\alpha/2)}{\cos(\alpha/2) + f \cdot \sin(\alpha/2)}$ ,

la relation se simplifie :

$$Tl_{contact} = \frac{P \cdot [m - f]}{1 + 0.2 \cdot [m - f]} \quad (3.5)$$

Cette formule permet donc de déterminer la compression du premier ressort au dernier point de contact à partir de la charge appliquée  $P$ . Cette compression  $Tl_{contact}$  est telle que :

$$Tl_{initial} < Tl_{contact} < Tl_{max}.$$

Une fois obtenu  $Tl_{contact}$ , la compression du deuxième ressort est calculée immédiatement par :

$$T2_{contact} = 0.2 \cdot Tl_{contact}. \quad (3.6)$$

A partir de la géométrie, nous obtenons la déflexion du premier ressort entre la position initiale et la position du dernier point de contact de la bille, nommée  $\Delta_l$ .

Cette déflexion vaut :  $\Delta_l = R \sin \alpha / 2 - (a + j)$ . De plus, un réglage maximum des ressorts doit permettre d'atteindre la charge de 360 kg, ceci permettant d'obtenir la valeur visée de 300 kg au milieu de la plage de réglage. Ainsi, nous devons tenir compte du réglage dû au cône (demi-angle au sommet du cône :  $\beta$ ). Nous appelons la valeur du réglage en x :  $Re\ glage\_x$ . Géométriquement et à partir d'une hypothèse sur la valeur du réglage en y "  $Re\ glage\_y$ ", nous avons :

$$Re\ glage\_x = Re\ glage\_y \cdot \tan \beta \quad (3.7)$$

La déflexion existante, en considérant le réglage par le cône, entre la position initiale et la dernière position de contact vaut alors :

$$\Delta_{intermédiaire} = \Delta_l + Re\ glage\_x \quad (3.8)$$

En faisant une hypothèse sur la valeur de  $TI_{initial}$ , nous pouvons déterminer directement la raideur du premier ressort,  $k_l$ . Celle-ci vaut :

$$k_l = \frac{TI_{contact} - TI_{initial}}{\Delta_{intermédiaire}} \quad (3.9)$$

La figure 43 illustre cette situation.

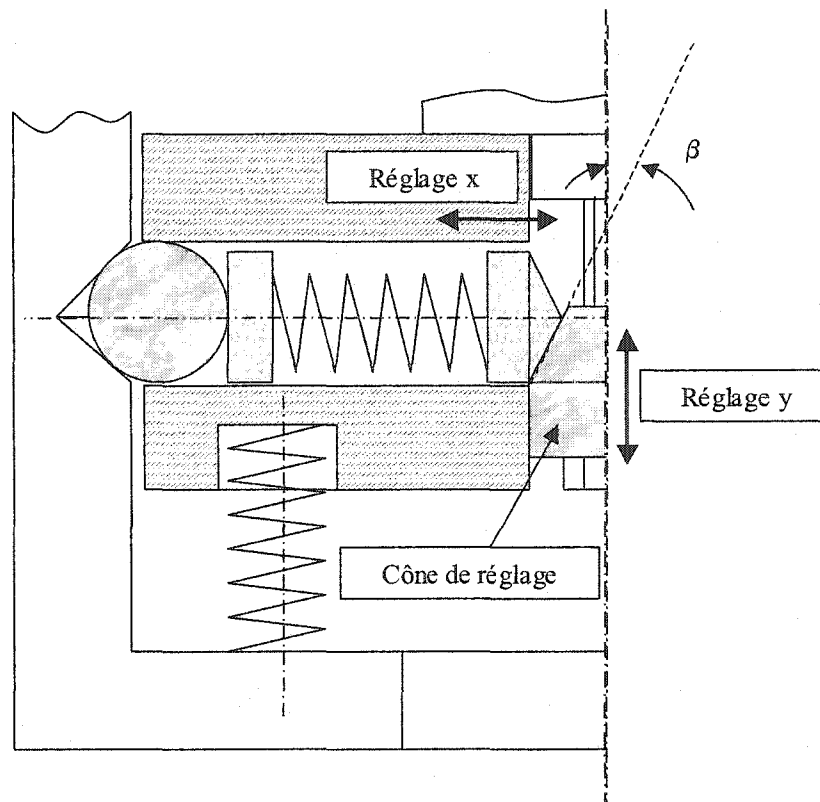


Figure 43 Modélisation du réglage du ressort horizontal

Nous connaissons à présent la raideur du premier ressort. La déflexion initiale du ressort lorsqu'il est installé dans son logement est donc accessible. Elle vaut :

$$\Delta x_{initial} = T l_{initial} / k_1 . \quad (3.10)$$

### Désengagement de la bille

La charge appliquée atteint sa valeur maximale au dernier point de contact de la bille avec la rainure. La bille sort alors de son logement pour entrer en contact avec le plan vertical du bâti. Le premier ressort est alors comprimé au maximum. Le bilan des forces est présenté dans la figure 44 :

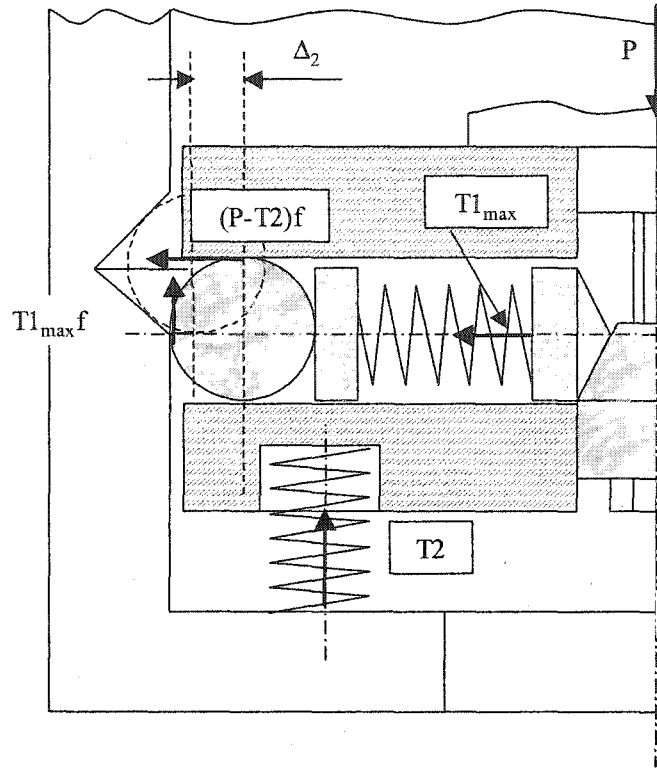


Figure 44 Position de sortie de la rainure en V

La compression du premier ressort est maximale :  $T1 = T1_{max}$ . La déflexion du ressort entre le dernier point de contact et cette position vaut alors :  $\Delta_2 = R \cdot (1 - \sin(\alpha/2))$  d'où la déflexion totale du ressort depuis la position initiale :

$$\Delta_{total\_1} = \Delta_{intermédiaire} + \Delta_2 + \Delta x_{initial} \quad (3.11)$$

Ainsi, la compression maximale du ressort vaut :

$$T1_{max} = k_1 \cdot \Delta_{total\_1} \quad (3.12)$$



### Fin de course de la bille

La charge est toujours appliquée sur l'échantillon, la bille continue sa course le long du plan vertical. Lorsque le levier atteint sa course maximale (14 mm), le ressort vertical est comprimé au maximum, la bille s'arrête. À ce moment, une fois que l'empreinte a été effectuée sur l'échantillon, il faut que le plateau mobile du limiteur remonte jusqu'à sa position initiale. Il faut donc que  $T2$  soit supérieure aux efforts de frottement engendrés par la compression du premier ressort sur la paroi  $TI_{max}$  pour permettre la remontée du plateau.

Ainsi, nous avons posé :  $T2_{initial} > TI_{max} \cdot f$  soit, en considérant un facteur de sécurité de 2,  $T2_{initial} = 2 \cdot TI_{max} \cdot f$ . Le plateau est alors assuré de remonter le long du plan vertical en l'absence de l'application de la charge  $P$  d'environ 360 kg. Dans la logique du calcul, nous faisons initialement l'hypothèse d'une valeur sur  $TI_{initial}$ , il est donc important à ce stade de vérifier qu'avec les calculs, nous obtenons bien :  $TI_{initial} > 2 \cdot TI_{max} \cdot f$ . En effet, il s'agit de coller la bille aux parois de la rainure en position initiale afin d'assurer les contacts. Si la valeur de  $TI_{initial}$  ne convient pas, il faut choisir une autre valeur. Avec cette hypothèse, nous pouvons alors revenir au calcul de la déflexion du deuxième ressort entre la position initiale et la position du dernier point de contact. La figure 45 illustre cette situation.

$$\tan \alpha / 2 \cdot \Delta_l = \Delta_y \quad \Delta_l = (R \cdot \sin(\alpha/2) - (a + j))$$

La déflexion  $\Delta_y$  est calculée géométriquement :

$$\Delta_y = \tan(\alpha/2) \cdot (R \cdot \sin(\alpha/2) - (a + j)) \quad (3.13)$$

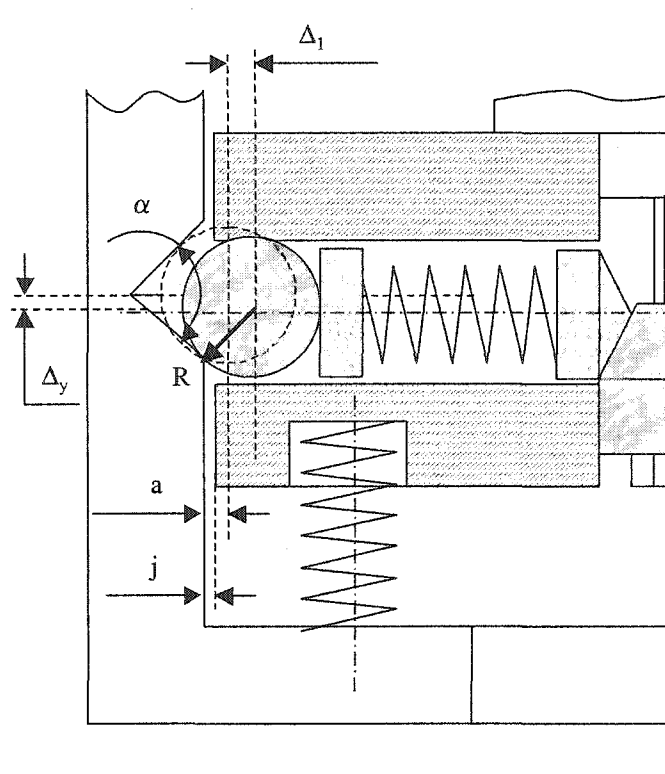


Figure 45 Calcul de la déflexion du ressort 2

Nous pouvons dès lors évaluer la rigidité  $k_2$  du ressort vertical :

$$k_2 = \frac{(T2_{\text{contact}} - T2_{\text{initial}})}{\Delta_y} = \frac{0.2 \cdot T1_{\text{contact}} - 2 \cdot T1_{\text{max}} \cdot f}{\Delta_y} \quad (3.14)$$

La déflexion initiale que subit le ressort lors de son installation dans son logement vaut :

$$\Delta y_{\text{initial}} = \frac{T2_{\text{initial}}}{k_2} = \frac{2 \cdot T1_{\text{max}} \cdot f}{k_2} \quad (3.15)$$

La déflexion totale subie par le ressort vertical est calculée comme suit :

$$\Delta_{total\_2} = \Delta y_{initial} + l/2 + course \quad (3.16)$$

Nous avons fixé ici la valeur du paramètre « course » à 8mm comme critère de conception. Ce paramètre correspond à la course effectuée par la bille une fois sortie de la rainure en V. Avec ce dernier résultat, la compression maximale du ressort vertical s'obtient par :

$$T2_{max} = k_2 \cdot \Delta_{total\_2} \quad (3.17)$$

La figure 46 montre la position de bout de course de la bille et le bilan des forces qui y est associé. Une fois la bille arrivée à cette position, le plateau mobile remonte et le limiteur de force se retrouve alors en position initiale.

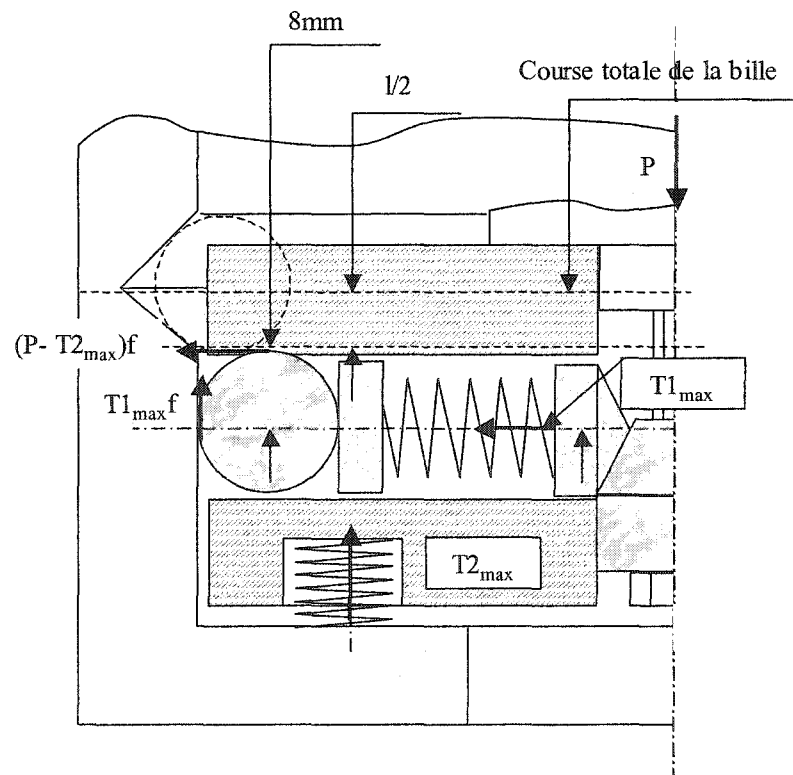


Figure 46 Position de la bille en bout de course

### 3.5.4 Modélisation sous MATLAB

Tous ces calculs ont été réalisés par un programme dans le logiciel Matlab, ce qui nous a permis d'automatiser les calculs par itération et de faciliter les changements de valeur des paramètres. Les programmes sont présentés en annexe du rapport (voir annexe 4). Les paramètres utilisés dans les programmes sont les suivants :

$\alpha$  : angle de la rainure ( $\alpha$  doit être supérieur à  $30^\circ$ ),  $\alpha = 86^\circ$

$\beta$  : demi-angle au sommet du cône ( $\beta$  doit être faible),  $\beta = 22,5^\circ$

$j$  : jeu entre le plateau mobile et le bâti fixe du limiteur,  $j = 0,3mm$

$R$  : rayon de la bille,  $R = 4,3655mm$ , ( $D = 11 / 32''$ )

$a$  : distance du diamètre de la bille à la paroi du plateau mobile en position initiale,  $a = 0,2R = 0,8731mm$

$l$  : largeur de la rainure,  $l = 9,3773mm$

$p$  : profondeur de la rainure,  $p = 5,03mm$

$Tl_{initial}$  : compression initiale du ressort horizontal,  $Tl_{initial} = 100N$

$Re\ glage\_y$  : plage de réglage vertical du cône du limiteur,  $Re\ glage\_y = 4mm$

$f$  : coefficient de frottement,  $f = 0,1$

$n = T2_{contact} / Tl_{contact}$ , ratio des compressions au point de contact,  $n = 20\%$

$u$  : ratio des compressions des ressorts en position initiale,  $u = 1,05$

Toutes ces valeurs ont été utilisées dans le programme Matlab « Ressort.m ». Ce programme permet de déterminer les dimensions des ressorts verticaux et horizontaux et donne leurs caractéristiques : raideur  $k$ , déflexion  $\Delta$  et la compression du ressort  $T$ .

En fonction des éléments existants dans les catalogues des fournisseurs et en fonction de nos souhaits de conception au niveau de la taille de l'appareil final, nous avons fait varier les paramètres afin d'obtenir les meilleurs résultats possibles (minimiser la taille

du limiteur de force), obtenir aisément les éléments dans le commerce (bille), faciliter l'usinage et enfin permettre une plage de réglage assez importante de façon à ce que  $P = 300\text{kg}$  se situe au milieu de l'intervalle. Avec un réglage minimum (position basse du cône), nous obtenons  $P = 228\text{kg}$  et avec un réglage maximum,  $P = 356\text{kg}$  (position haute du cône).

Les résultats obtenus avec le programme précédent sont à leur tour utilisés dans le programme « Final.m », ce qui permet, en l'exécutant, d'obtenir à partir des valeurs trouvées dans les catalogues les caractéristiques finales des deux ressorts ainsi que plusieurs courbes illustrant les résultats de la modélisation du problème. L'une des plus intéressantes est celle de la variation de la charge appliquée à l'aide du levier par l'opérateur en fonction de la position de la bille à partir de sa position initiale dans la rainure. Cette courbe est présentée sur la figure 47.

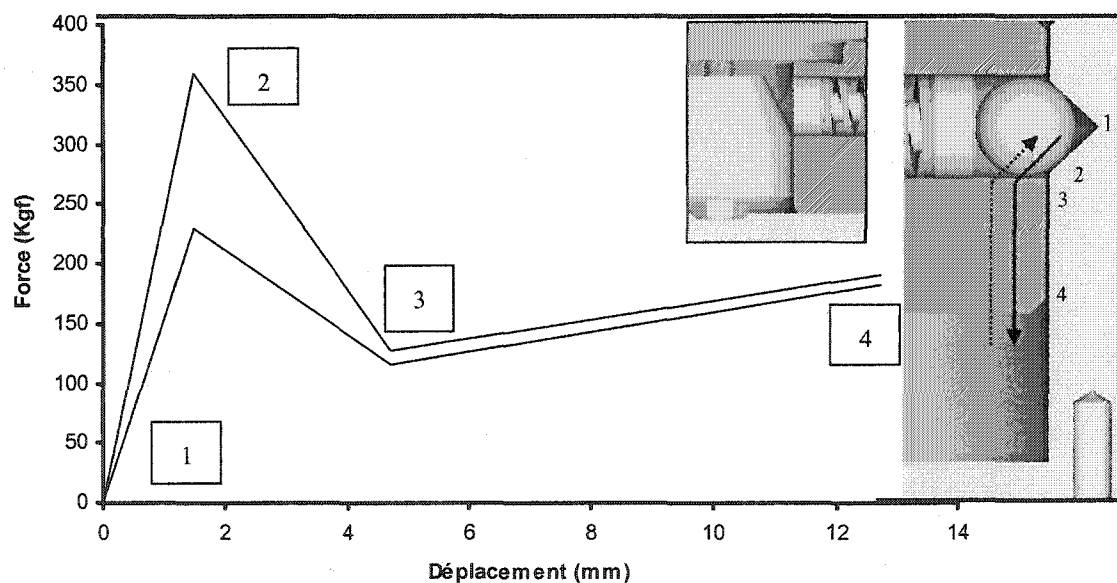


Figure 47 Charge appliquée vs position de la bille

L'explication étape par étape de la figure 47 est la suivante :

Point 1 – Point 2 :

Au début, aucune charge n'est appliquée sur la bille. Le levier est en position haute. L'opérateur commence à actionner le levier d'application de la charge pour effectuer l'essai de dureté. La force augmente donc progressivement jusqu'à ce qu'elle atteigne la valeur maximale pour laquelle l'empreinte est réalisée sur l'échantillon à tester. La bille est alors au dernier point de contact avec la rainure.

Point 2 – Point 3 :

L'opérateur continue d'actionner le levier. La bille se désengage de la rainure et l'opérateur sent alors le mouvement brusque du levier. Il sait alors que l'empreinte a été effectuée au point 2. Le plateau mobile translate vers le bas, il y a peu de résistance jusqu'au point 3, la force diminue donc jusqu'à ce point.

Point 3 – Point 4 :

A partir du point 3, la valeur de la force augmente à nouveau. En effet, l'action de l'opérateur sur le levier rentre alors en opposition avec le ressort 2 qui se comprime de plus en plus et qui possède donc une compression de plus en plus élevée. Le point 4 représente le bout de course du levier d'application de la charge. L'essai de dureté est terminé. L'opérateur relâche alors le levier, le plateau mobile remonte de ce fait sous l'action des ressorts verticaux qui se détendent. La bille réalise le même chemin mais dans le sens de retour. Le limiteur de force se retrouve en position initiale, prêt à l'emploi pour un nouvel essai.

Enfin, en plus de ces courbes, les programmes MATLAB ont donné les différentes caractéristiques du problème. Les résultats correspondant au choix final des ressorts

pour la conception sont présentés dans le tableau XV.

Tableau XV

Caractéristiques techniques des ressorts

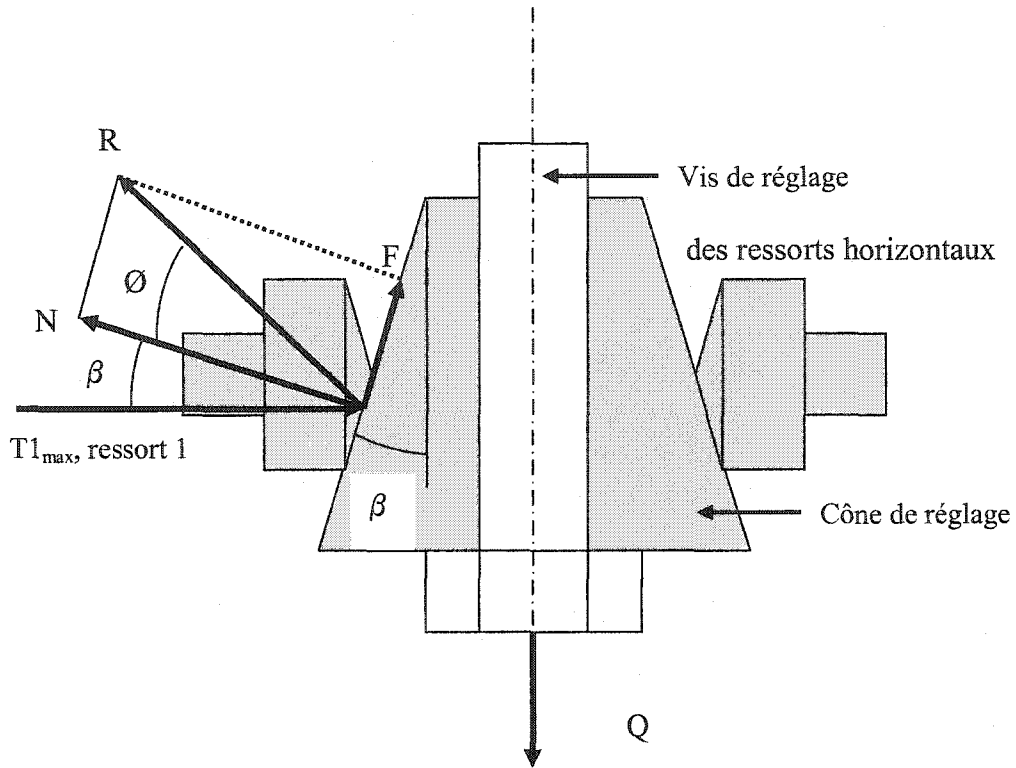
	Ressort 1 (horizontal)				Ressort 2 (vertical)			
Modélisation (programme Ressort.m)	K	$\Delta l$	$\Delta l_{01}$		K	$\Delta l$	$\Delta l_{02}$	
	74.78 N/mm	5.99 mm	1.34 mm		13.88 N/mm	19.14 mm	6.45 mm	
Ressorts normalisés (Catalogue)	K	$\Delta l$	$\phi$	Long. Libre	K	$\Delta l$	$\phi$	Long. Libre
	73.57 N/mm	6 mm	10 mm	30 mm	14.39 N/mm	20.22 mm	12.19 mm	50.8 mm
Programme Final.m	$\Delta l_{01}$				$\Delta l_{02}$			
	1.3592 mm				6.1351 mm			
Référence	ASB10x30, (JIS) Die spring, Brown series - JIS B 5012				C0 480-081-2000, (Compression springs – Music Wire SPEC)			

### 3.5.5 Calcul de la vis de réglage de la compression des ressorts

La vis de réglage de la précharge des ressorts horizontaux est l'un des éléments les plus importants du limiteur. Il est donc nécessaire de bien la dimensionner. Elle supporte en effet une composante tangentielle due aux compressions des ressorts s'appliquant sur le cône de réglage (L. Faure (1991)). La figure 48 illustre cette situation.

La figure 48 montre les différentes forces mises en jeu lorsque le ressort horizontal exerce une compression sur le cône. Nous avons alors :

$$\vec{R} = \vec{N} + \vec{F} \text{ avec } R = \frac{N}{\cos \varphi} = \frac{F}{\sin \varphi} \quad (3.18)$$



$$f = \tan \phi, \quad F = N \cdot \tan \phi \quad f = 0.1$$

Figure 48 Bilan des forces sur le cône de réglage

Projection sur  $\vec{x}$

$$Tl_{max} - \left( \frac{N}{\cos \varphi} \right) \cdot \cos(\varphi + \beta) = 0 \quad \text{d'où} \quad N = \frac{Tl_{max} \cdot \cos \varphi}{\cos(\varphi + \beta)} \quad (3.19)$$

Projection sur  $\vec{y}$

$$\left( \frac{F}{\sin \varphi} \right) \cdot \sin(\varphi + \beta) - Q = 0 \quad \text{d'où} \quad Q = \frac{F \cdot \sin(\varphi + \beta)}{\sin \varphi} \quad (3.20)$$



Or  $F = N \cdot \tan \varphi$ , d'où :

$$Q = \frac{N \cdot \tan \varphi \cdot \sin(\varphi + \beta)}{\sin \varphi} = \frac{N \cdot \sin(\varphi + \beta)}{\cos \varphi}$$

et, avec l'expression (3.20), on obtient :

$$Q = \frac{Tl_{\max} \cdot \cos \varphi \cdot \sin(\varphi + \beta)}{\cos \varphi \cdot \cos(\varphi + \beta)} = Tl_{\max} \cdot \tan(\varphi + \beta) \quad (3.21)$$

Les valeurs des différents paramètres sont les suivantes :

$$Tl_{\max} = 442.04 N \quad (\text{valeur donnée par le programme MATLAB})$$

$$\varphi = \arctan(f) = \arctan(0.1) = 5.71^\circ$$

$$\beta = 22.5^\circ$$

L'application numérique donne alors :

$$Q = 237.12 N$$

$Q$  correspond à la composante tangentielle engendrée par un ressort. Il y a 6 ressorts en tout, ce qui donne une résultante sur la vis valant :

$$Q_{\text{total}} = 6Q = 1423 N \quad (3.22)$$

Or, lorsqu'un boulon est soumis à un effort de traction axiale, l'effort maximal qu'il peut supporter sans se déformer de façon permanente peut être calculé de la façon suivante (J. Guillot (1987)) :

$$F_{B \max} = 0.9 \cdot R_{e \min} \cdot A_s \quad (3.23)$$

Avec  $A_s$  qui est la section résistante de la tige de la vis et  $R_{e \min}$  qui est la limite d'élasticité minimale de la classe de qualité considérée. La section résistante  $A_s$  a pour expression (J. Guillot (1987)) :

$$A_s = \frac{\pi}{4} \cdot \left( \frac{d_2 + d_3}{2} \right)^2 \quad (3.24)$$

Avec  $d_2 = d - 0.6495 \cdot p$ ,  $d_3 = d - 1.2268 \cdot p$ ,  $p$  le pas de la vis et  $d$  son diamètre nominal. Pour une vis de grade 2 (classe 5.8), pour laquelle la limite d'élasticité minimale vaut 392 MPa et une force  $F_{B \max} = Q_{total}$ , on a alors avec la relation (3.24) :

$$A_s = \frac{F_{B \max}}{0.9 \cdot R_{e \min}} = \frac{1423}{0.9 \cdot 392} = 4.03 \text{ mm}^2$$

Pour notre application, il faut donc que la vis choisie ait une section résistante supérieure à celle calculée précédemment. Pour une vis de diamètre nominal 3mm,  $A_s = 5.03 \text{ mm}^2$ .

Pour notre application, nous avons choisi une vis 1/4" – 28. Son diamètre nominal vaut 6.35mm et son pas est fin. Nous nous assurons ainsi que la vis résistera aux efforts qu'elle subit avec un facteur de sécurité de "2", et qu'elle ne se déformera pas. Les autres vis intervenant dans le mécanisme ne feront pas l'objet d'un dimensionnement aussi précis car elles ne sont pas soumises à des efforts aussi importants que la vis principale de réglage de précharge des ressorts horizontaux.

### 3.6 Analyse par éléments finis

#### 3.6.1 Déformation de la semelle

Étant conscient de l'importance de la précision que doit avoir n'importe quel appareil de mesure, nous avons essayé de prévoir le comportement des différentes parties de notre appareil lors des essais. Après une certaine analyse, nous nous sommes rendu compte que la pièce la plus sollicitée et qui est susceptible de subir une certaine déformation (flexion) est la semelle sur laquelle se repose tout l'appareil. La figure 49 montre d'une façon exagérée la déformation causée par l'application de la force d'où le risque d'affecter la qualité des empreintes que nous désirons avoir. Ainsi au lieu que l'échantillon testé ait juste une réaction normale s'opposant à la pénétration de la bille, il va y avoir une autre composante tangentielle engendrée par la flexion de la semelle. Ceci nous amène à avoir des empreintes qui ont une forme qui n'est parfaitement sphérique.

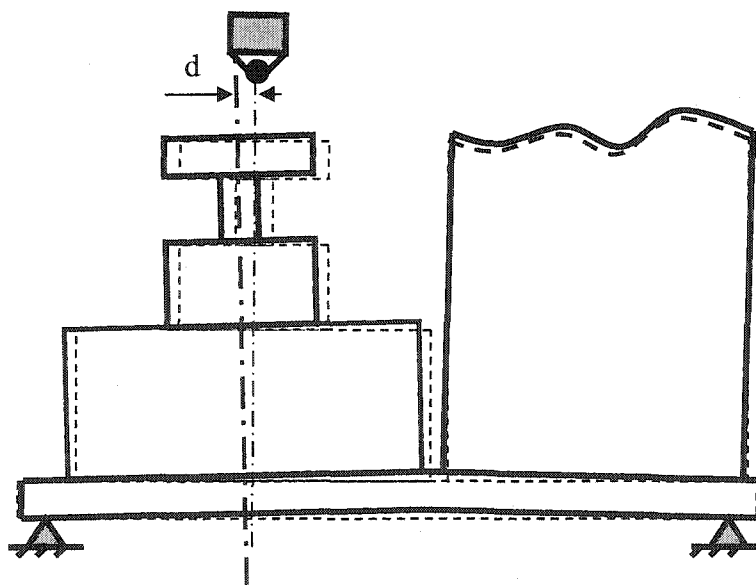


Figure 49 Déformation de la semelle lors d'un essai de dureté

### 3.6.2 Diagramme des forces et réactions agissant sur l'appareil

Avant de commencer les analyses par éléments finis, nous avons déterminé les forces et les réactions qui s'exercent sur tout l'appareil à travers le DCL (voir annexe 5) du système de levier simplifié (voir figure 50).

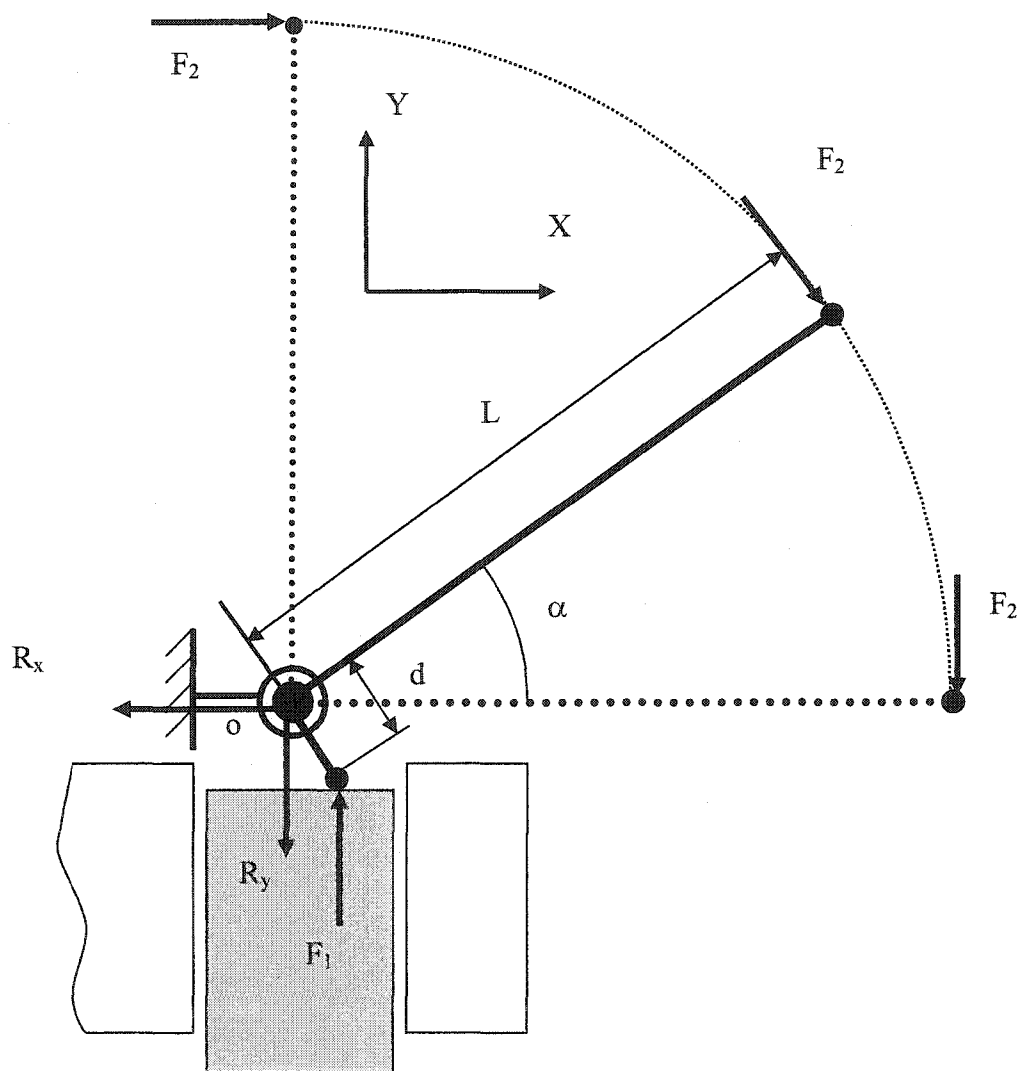


Figure 50 Forces et réactions agissant sur le système du levier

La figure 51 montre l'évolution de  $F_2$ ,  $R_x$  et  $R_y$  selon l'angle d'inclinaison  $\alpha$  du levier par rapport à l'horizontale, et ce, en négligeant les forces de frottement. Notons que plus tard dans les analyses par éléments finis, nous allons utiliser les valeurs des forces et réactions pour l'angle  $\alpha$  de  $45^\circ$ .

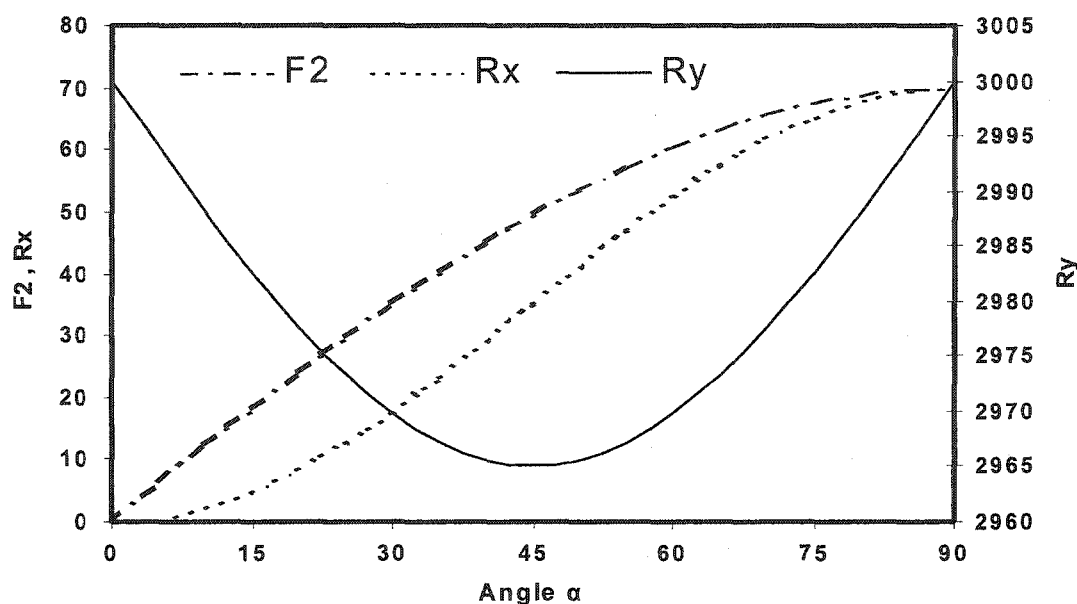


Figure 51 Variation de  $F_2$ ,  $R_x$  et  $R_y$  en fonction de l'angle  $\alpha$

### 3.6.3 Modélisation avec ANSYS

La première simulation que nous avons réalisée a été faite à l'aide du logiciel commercial ANSYS. Il faut rappeler que l'objectif de cette modélisation est de déterminer l'épaisseur de la semelle qui permet d'avoir une déformation tolérable. Dans cette partie, nous avons modélisé uniquement la semelle, en appliquant les conditions aux frontières nécessaires (blocages et forces).



D'autres simulations ont été réalisées (voir figure 53), pour lesquelles nous avons utilisé l'acier (AISI 4140) comme matériau. Notons que pour des épaisseurs supérieures à 30mm le déplacement maximal est inférieur à la valeur fixée selon l'hypothèse.

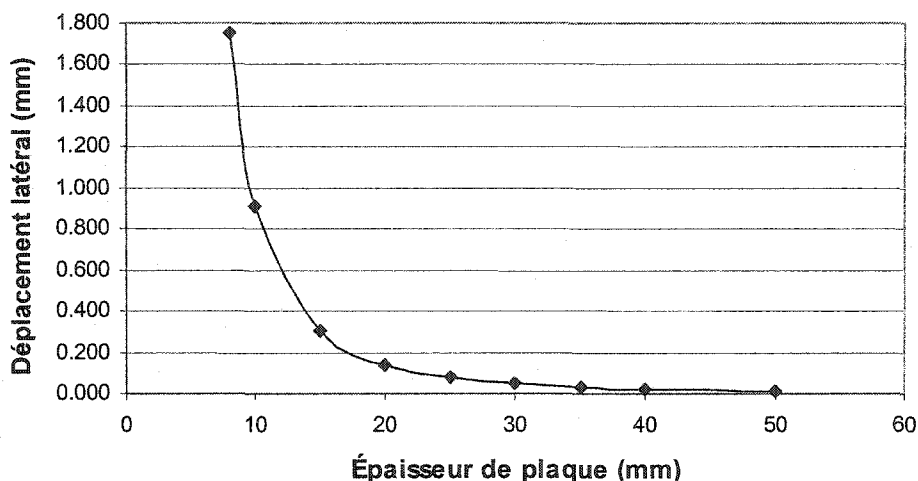


Figure 53 Résultats des simulations avec différentes épaisseurs

### 3.6.4 Modélisation avec PRO/MECHANICA

Le module Pro/Mechanica de Pro/Engineer, un autre logiciel commercial, nous offre la possibilité de modéliser facilement des géométries complexes. Nous pouvons même modéliser un assemblage de pièces en définissant les surfaces de contact. Comme le montre la figure 54 nous avons modélisé l'appareil en deux pièces (la structure et le limiteur de force une seule pièce en aluminium 6061, et la tige qui applique la force une autre pièce en acier AISI 4140) en appliquant les blocages et les forces requis sur notre modèle simplifié. La figure 55a nous montre les contraintes de Von Mises de la simulation de l'appareil tel que conçu préalablement. La figure 55b nous donne le déplacement relatif entre l'axe du limiteur et l'axe de tige qui sert à appliquer la force, ayant une valeur de décalage de : 0.44mm, très proche de la valeur trouvée à l'aide d'ANSYS (0.45mm).

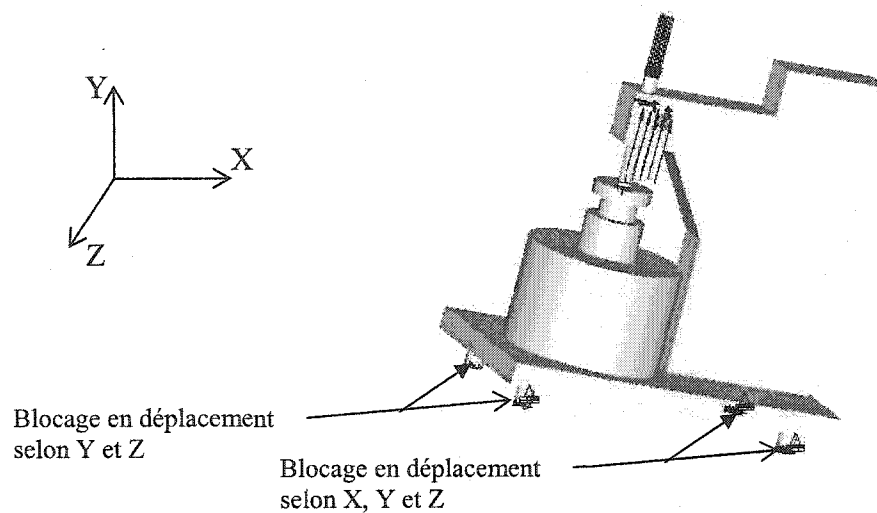


Figure 54 Condition aux frontières appliquées sur le modèle

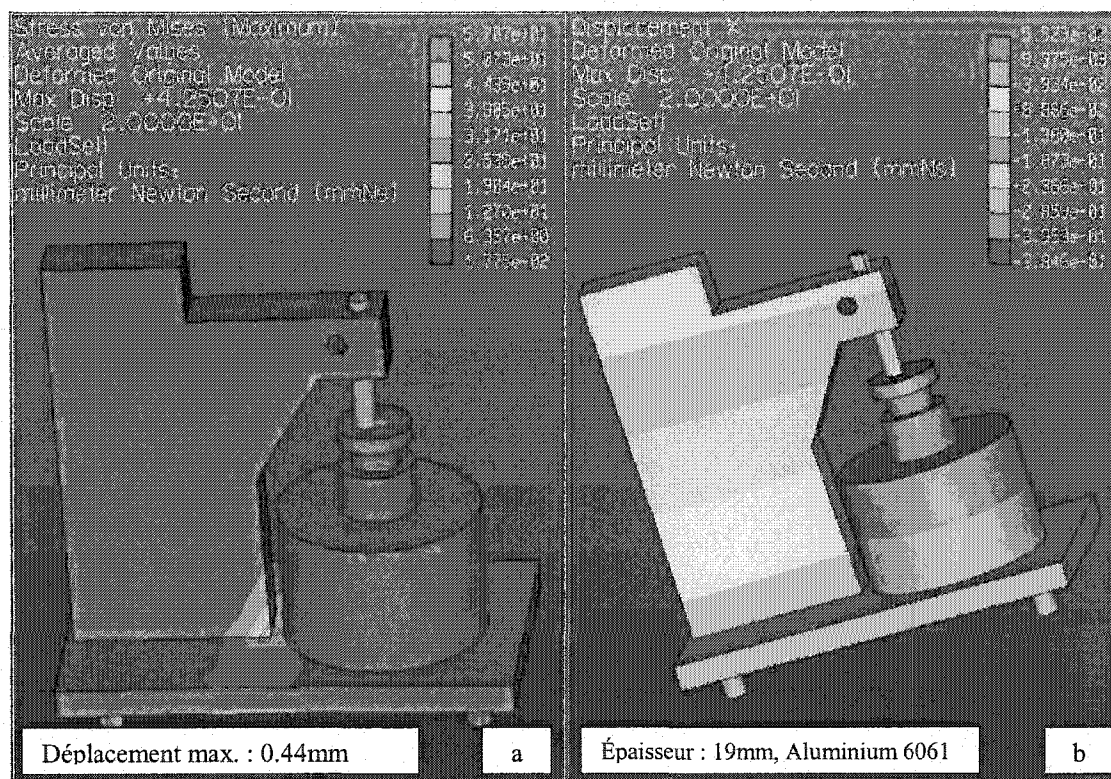


Figure 55 Résultats obtenus avec Pro/Mechanica, épaisseur : 19 mm



Afin de valider le résultat trouvé par ANSYS qui satisfait notre hypothèse (déplacement permis = 0.05mm) pour une semelle en acier AISI 4140 d'épaisseur 30mm, nous avons effectué une autre simulation à l'aide Pro/Mechanica avec les mêmes conditions. La simulation a été réalisée comme pour le dernier cas, sauf qu'ici la semelle est en acier aussi. Dans ce cas, nous pouvons constater que la semelle est beaucoup moins sollicitée. Finalement, nous avons choisi pour notre prototype une semelle en acier AISI 4140 d'épaisseur 30 mm.

### 3.7 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons vu les étapes de développement et plus particulièrement l'aspect choix des paramètres, modélisation et conception de l'appareil destiné à l'identification des grades dans les postes d'Hydro-Québec. Le prototype a été validé par le client. Cependant, lors de la présentation de notre solution technique, celui-ci a suggéré de prendre plus en compte le facteur humain en ce qui concerne la lecture des empreintes, ce problème sera étudié en détail dans le chapitre suivant.

Tel que conçu, la précision et la fiabilité de notre prototype restent à juger et à évaluer après l'étape de fabrication. Toutefois, il faut souligner que lors de l'étape de conception, nous avons essayé de prévoir et de penser à tous les problèmes qui peuvent surgir une fois l'appareil réalisé. Ceci en donnant à ce dernier une grande flexibilité grâce à des mécanismes de réglage et d'ajustement.

## **CHAPITRE 4**

### **ANALYSE ET OPTIMISATION DE LA LECTURE DES RÉSULTATS**

#### **4.1 Introduction**

L'un des problèmes auquel nous avons pensé lors des essais de simulation de l'essai de dureté Brinell concerne la lecture des empreintes. Le but derrière les essais que nous comptons réaliser avec notre appareil, n'est pas vraiment de savoir la valeur selon les échelles conventionnelles de dureté, mais c'est plutôt de distinguer et d'identifier visuellement les empreintes. Dans ce chapitre, nous allons étudier ce problème qui met en évidence le facteur humain.

#### **4.2 Lecture des empreintes**

Dans cette partie, nous allons voir le pouvoir humain de distinction visuelle. Pour ce faire, nous avons essayé de comparer la capacité de vision d'une personne normale, par rapport aux exigences requises pour notre application. Par la suite, nous allons montrer quelques exemples de moyens optiques disponibles sur le marché qui peuvent être une autre alternative pour l'identification des empreintes, pour les gens qui éprouvent quelques difficultés au niveau de leur vision.

##### **4.2.1 Pouvoir de détection des empreintes à l'œil nu**

La différence entre l'empreinte de grade 2 et de grade 5 vaut environ 0.2 mm. Nous nous sommes donc intéressés au facteur humain du problème et plus particulièrement à

l'acuité visuelle humaine. Ce qui nous intéresse ici, c'est en effet le pouvoir de séparation de l'œil : 0,0003 radian, soit un arc de 1 minute (1/60 de degré), ce qui correspond à 0,1 mm vu à 25,4 cm (d'après J. P. Perez (1994)), distance appelée « distance minimale de vision distincte ». L'*acuité visuelle unité* est celle qui permet de séparer 2 points ou 2 lignes vus sous un angle de 1 minute d'arc. Il faut bien noter ici que 0,1 mm correspond à la valeur pour une vision normale, à savoir que l'on ne considère ici que la diffraction comme facteur limitant l'acuité visuelle. L'acuité visuelle varie d'une personne à l'autre, est en général pas différente pour les deux yeux. Elle décroît avec l'âge et la fatigue de la vue et même la fatigue générale. La structure granulaire de l'œil limite la capacité de l'œil à distinguer des détails. En effet, si la distance entre les deux images ponctuelles sur la rétine est trop faible, une seule cellule est impressionnée et le cerveau ne fait aucune différence entre ces deux points. Pour que la séparation des points puisse se faire sans ambiguïté, il faut que les images se forment sur deux cellules séparées par une troisième. Afin de mieux comprendre le fonctionnement de l'œil, considérons la figure 56 dans laquelle  $g$  dénote le diamètre d'une cellule et  $\theta$  est l'angle sous lequel l'œil voit l'objet formé des deux points  $A_i B_i$ . Nous devons avoir  $N_i F_i \cdot \theta > 2g$ , ce qui s'écrit aussi  $\theta > \varepsilon$  avec  $\varepsilon = 2g / N_i F_i$ .

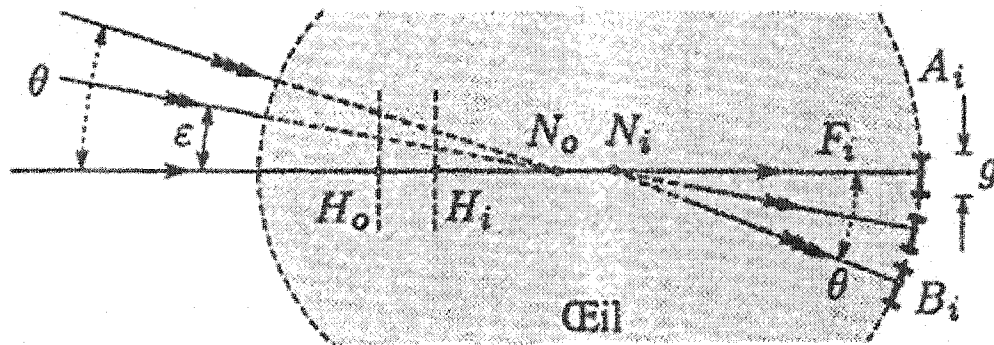


Figure 56 Principe de visualisation de l'œil humain<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Tiré et adapté de J. P. Perez (1994)

L'angle  $\varepsilon$  définit la limite de résolution angulaire de l'œil. Comme  $\overline{N_i F_i} = \overline{H_i F_i} - \overline{H_i N_i} = -f_0 = 16,7 \text{ mm}$  (formules classiques d'optique) et  $g \approx 4 \mu\text{m}$ , la valeur de  $\varepsilon$  est d'environ 1 minute d'angle soit un pouvoir de résolution d'environ 0,1 mm.

En comparant cette information avec notre application qui demande une distinction de 0,2 mm entre les empreintes de grade 2 et grade 5, nous remarquons que, dans des conditions idéales (éclairage, œil parfait, non-prise en compte des aberrations chromatiques), l'œil est capable de faire la différence entre les grades. En effet, son pouvoir de résolution de 0,1 mm permet donc l'identification des grades. Toutefois, nous sommes conscients que ce pouvoir séparateur d'une valeur de 0,1 mm n'est valable que dans le cas d'un œil parfait. En effet, toute cause supplémentaire de détérioration de l'acuité visuelle ne peut contribuer qu'à augmenter la valeur du pouvoir séparateur, ce qui a pour effet de limiter la capacité de l'œil à distinguer les détails. Il est en effet très probable que tous les opérateurs n'auraient pas une acuité visuelle de 10/10, l'âge jouant en plus un rôle important. Cependant, il est nécessaire de préciser que les calculs effectués ci-dessus correspondent à la distinction de deux points et non de deux empreintes.

#### 4.2.2 Sondages et résultats obtenus

##### Objectif

L'objectif du sondage est de déterminer la probabilité de détection des grades 2 et 5 des boulons sur une population représentative des opérateurs d'Hydro-Québec.

##### Échantillons

Les échantillons utilisés pour le sondage contiennent des empreintes obtenues à partir de pièces ayant trois états de surface différents (voir tableau XVI) : trois pour le grade 2, et

trois pour le grade 5. Chaque échantillon est un bout de tige filetée du boulon. L'empreinte est effectuée sur la surface de coupe de la tige. Les finis de surface utilisés sont :

- Surface meulée - grain fin;
- Surface intermédiaire - grain grossier;
- Surface non meulée.

### **Population**

La population doit être représentative des employés des postes Hydro-Québec, soit une population d'hommes et de femmes, de 20 à 60 ans, non nécessairement spécialistes de la mécanique. Le nombre de personnes à sonder devrait être au moins 20 personnes, ce qui permettra de tirer des conclusions.

### **Conditions d'observation**

Il faut considérer toutes les conditions d'observation tel que éclairage, distance d'observation, pour se rapprocher le plus possible de la réalité.

### **Temps d'exposition**

Les personnes sondés doivent être tous exposés durant un même temps aux échantillons et dans la mesure du possible, celui qui réalise l'expérience doit essayer de respecter cette même valeur pour tous les participants. Ce temps d'exposition maximal serait de 10 secondes par échantillon.

### **Déroulement du sondage**

Chaque expérience demande au sondé de répondre à une question lorsqu'on lui présente deux échantillons.

**- 1 question :**

« Sur les deux empreintes que vous voyez, y en a-t-il une qui soit plus grande, identique ou plus petite que l'autre ? »

**- 3 réponses possibles :**

a) Cette empreinte est plus grande que l'autre (ou plus petite que l'autre).

b) Après un temps d'exposition, je ne vois pas.

c) Elles sont identiques.

**Présentation des échantillons au sondé**

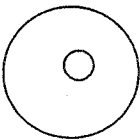
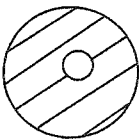
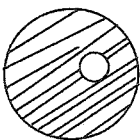
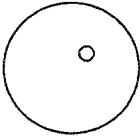
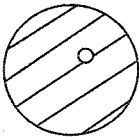
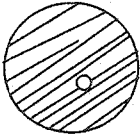
On présente au sondé deux échantillons en même temps : il y a 3 échantillons par grade.

Chacun va donc être comparé aux 5 autres existants.

Il y aura donc en tout  $5 + 4 + 3 + 2 + 1 = 15$  expériences à faire pour chaque personne sondée.

Tableau XVI

Échantillons utilisés durant le sondage

	surface meulée – grain fin	surface non- meulée	surface meulée – grain grossier
Grade 2			
Grade 5			

### **Feuille de sondage**

La feuille de sondage (voir annexe 7) sera numérotée pour connaître le nombre de sondages effectués. Nous demandons de remplir plusieurs champs : date du sondage, nom de la personne sondée, nom de la personne menant le questionnaire, la fonction de la personne sondée et son âge si possible, celui-ci étant un paramètre très influent sur la détection des empreintes.

### **Résultats du sondage**

Les résultats colligés sur la feuille de sondage permettent de déterminer des probabilités de détection par personne puis, avec l'ensemble des feuilles de sondage, de calculer des probabilités de détection pour l'ensemble de la population. Ainsi, la probabilité de détection sachant que les empreintes présentées aux sondés sont différentes est : 90,00%, ce qui montre que la détection des grades à l'œil nu est relativement facile. En plus il faut être conscient de l'importance de l'état de surface de l'échantillon. En effet, on note une plus faible probabilité de détection pour les mauvais états de surface (le pourcentage de distinction pour les échantillons ayant une bonne état de surface était de 100%). Toutefois, nous devons noter que la détection des empreintes identiques est plus difficile, car les personnes sondées essayent de trouver une différence. On note qu'il y a aucune réponse « Je ne sais pas » de la part des personnes sondées.

#### **4.2.3 Utilisation du comparateur optique**

Etant données les limites de l'œil humain et la dégradation des capacités visuelles avec l'âge, il est peut-être préférable de penser à fournir aux opérateurs des moyens optiques simples qui existent déjà sur le marché (voir figure 57). Ces petits appareils ont généralement un grossissement de 20X, et comportent aussi une petite source de lumière intégrée. Quant à la lentille, elle peut contenir des graduations pour mesurer le diamètre de l'empreinte, ou tout simplement des marquages de petits cercles (voir figure 58) dont

on connaît le diamètre. Il suffit donc de comparer les empreintes avec les marquages sur les lentilles.

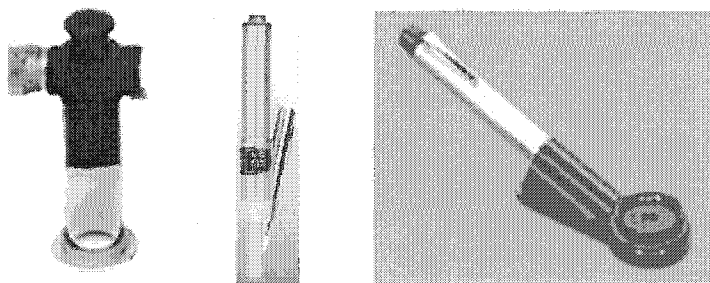


Figure 57 Quelques exemples de comparateurs optiques

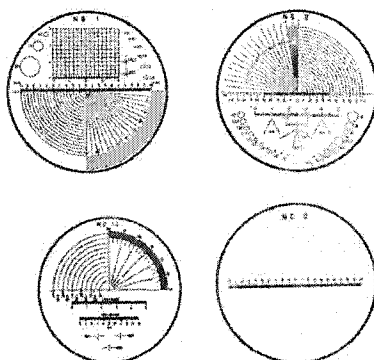


Figure 58 Quelques exemples de marquages sur lentilles

#### 4.3 Essais et étude d'autres formes de pénétrateurs

Afin de vérifier s'il existe d'autres formes de pénétrateurs qui peuvent nous offrir plus de facilité de détection des grades à l'aide des empreintes, nous avons fait de multiples essais avec différentes formes (coniques, cruciforme, etc.). Toutefois, nous n'avons pas trouvé des résultats meilleurs que ceux réalisés avec la bille de 3,175mm et une force de 300kgf. Cependant, la forme conique mérite d'être étudiée plus en profondeur car nous



avons réalisé des essais avec un angle de 120 degrés seulement, vu le coût relié à la préparation et l'usinage d'autres cônes ayant des angles différents. Nous allons essayer de prédire les résultats d'une façon théorique en faisant une analogie avec des essais de dureté réalisés avec des billes de différents diamètres. Pour cela, nous allons voir comment Brinell a établi la relation qui permet de calculer la dureté HB à partir du diamètre de l'empreinte. Par la suite nous allons faire une comparaison théorique de la variation de Delta\_d (Gr.2 & Gr.5) entre le pénétrateur sphérique et le pénétrateur conique.

### Indentation sphérique :

Principe de la dureté Brinell (voir figure 59) :

$$HB = \frac{F}{S}$$

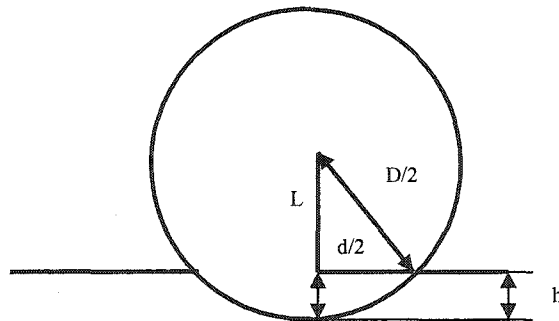


Figure 59 Essai de dureté réalisé avec un pénétrateur sphérique

$$\text{Or } S = \pi \cdot D \cdot h \quad \text{et} \quad h = \frac{D}{2} - L$$

$$\text{Et } L = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{D^2 - d^2}$$

$$\text{Donc : } S = \pi \cdot D \cdot \left( \frac{D}{2} - \frac{1}{2} \cdot \sqrt{D^2 - d^2} \right)$$

On retrouve la formule déjà utilisée :

$$HB = \frac{2 \cdot F}{\pi \cdot D \cdot (D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

**Indentation conique** (voir figure 60) :

Avec le même raisonnement que dans le cas de la dureté Brinell on aura :

$$H = \frac{F}{S} \quad (4.1)$$

avec : F(kgf) : Charge appliquée

S (mm<sup>2</sup>) : Aire de l'empreinte

Le nombre H correspond à une pression qui est analogue au nombre HB.

$$S = \pi \cdot r \cdot \sqrt{h^2 - r^2} \quad \text{et} \quad r = h \cdot \tan(\alpha),$$

$$\text{donc : } S = \pi \cdot 4 \cdot r^2 \cdot \frac{1}{4} \cdot \sqrt{1 + \frac{1}{\tan^2(\alpha)}} \quad (4.2)$$

Et finalement :

$$H = \frac{F}{\pi \cdot r^2 \cdot \sqrt{1 + \frac{1}{\tan^2(\alpha)}}} \quad (4.3)$$

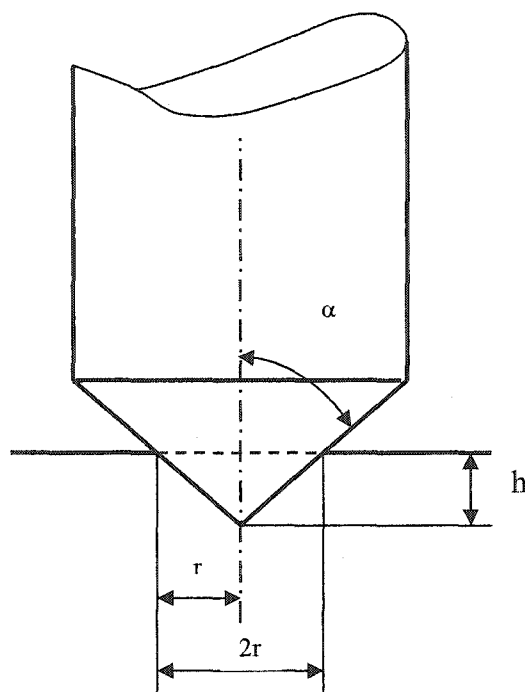


Figure 60 Essai de dureté réalisé avec un pénétrateur conique

Connaissant la dureté HB requise pour les boulons de grade 2 et 5, et en utilisant l'équation 4.3, nous avons calculé (voir tableau XVII) la dureté H selon l'échelle que nous avons établie précédemment. Ainsi, nous avons trouvé que le rapport HB/H montre que notre raisonnement est assez valable, puisque les valeurs de ce rapport sont presque identiques.

Tableau XVII

Calcul de la valeur de dureté H pour les grades 2 et 5

	HB	HRA	h	r	H <sup>1</sup>	HB/H
Grade 2	193	55	0,090	0,1558	681	0,28
Grade 5	249	62	0,076	0,1316	955	0,26

<sup>1</sup> La force utilisée a une valeur de 300 kgf

En utilisant l'équation 4.3, et connaissant les deux valeurs de dureté  $H$  pour les grades 2 et 5, en faisant varier l'angle du cône, nous avons pu voir l'évolution avec la figure 61 du  $\Delta d$  (Gr.2 & Gr.5) en fonction de l'angle au sommet du pénétrateur. Les résultats trouvés montrent que l'idée d'utiliser un cône au lieu d'une bille n'est pas vraiment intéressante. En effet, pour des angles allant de 70 à 170 degrés, la différence  $\Delta d$  des diamètres des empreintes ne dépasse pas 0,12mm, or pour le cas de la bille de diamètre 3,175mm cette différence est d'environ de 0,2mm.

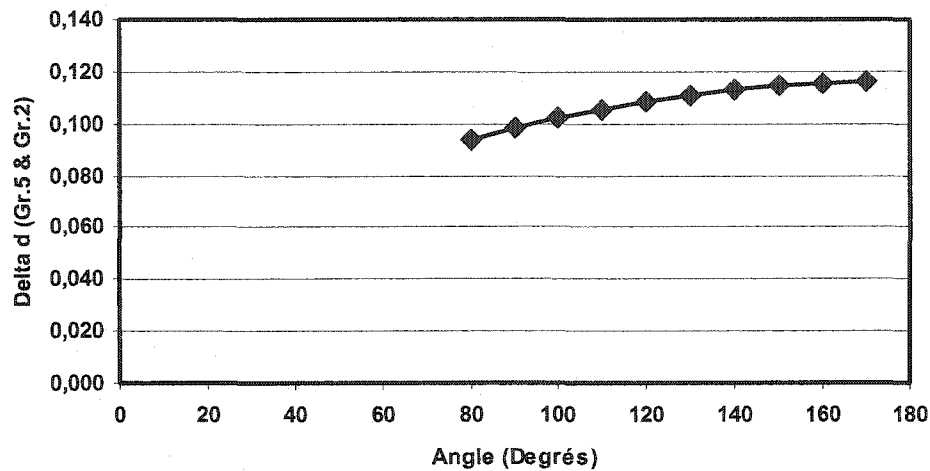


Figure 61 Variation de  $\Delta d$  (Gr.5 & Gr.2) en fonction de l'angle du cône

#### 4.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons vu les difficultés reliées à la lecture des empreintes. En effet, ce problème n'est pas moins important que la conception même de l'appareil, car l'identification des empreintes, fait intervenir le facteur humain qui n'est pas toujours facile à contrôler. Par contre, l'appareil a été conçu d'une manière telle que même un opérateur pas qualifié peut effectuer les essais sans aucune difficulté.

## CHAPITRE 5

### CALIBRAGE ET EXPERIMENTATION

#### 5.1 Fabrication et montage de l'appareil

Suite à l'achèvement de la partie conception et de la confection des plans incluant la cotation, la précision des intervalles de tolérance et les détails de fabrication (voir annexe 8), l'étape suivante était la fabrication de l'appareil. Une fois toutes les pièces usinées ou commandées (tel que les ressorts, les billes, visserie), il ne reste que le montage de l'ensemble. Ce dernier est constitué de deux parties : la structure qui permet d'appliquer la force à l'aide du levier et le limiteur de force (voir figure 62).

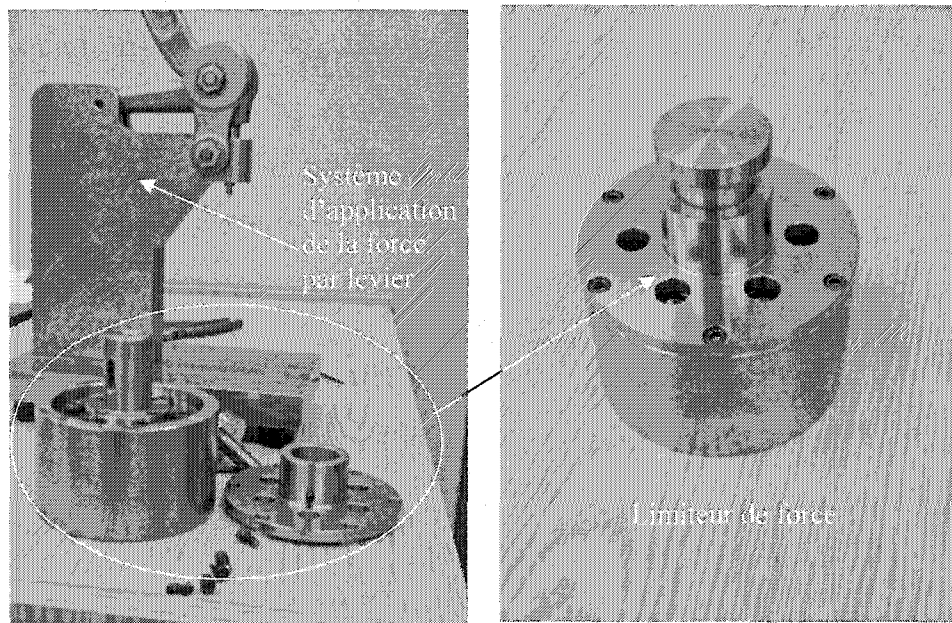


Figure 62 Montage des deux éléments de l'appareil

## 5.2 Résultats des essais de calibrage de l'appareil

Avant d'utiliser l'appareil, nous avons procédé au calibrage du limiteur de force. Pour ce faire, nous avons utilisé un montage existant comportant une cellule de charge, un système hydraulique qui permet l'application de la force et deux cadrans servant à l'affichage de la force et du déplacement. La figure 63 montre les détails du montage utilisé. Le calibrage de l'appareil va nous permettre essentiellement de faire les réglages nécessaires pour fixer la valeur de la force à laquelle notre essai de dureté va être effectué. Cette opération va nous permettre de comparer et de juger la correspondance des résultats des essais avec la modélisation et les hypothèses qui ont été prises lors de la phase de conception. Plus tard dans ce chapitre, nous allons évaluer, discuter et analyser les caractéristiques et les imprécisions de notre appareil, et essayer d'identifier les causes des erreurs.

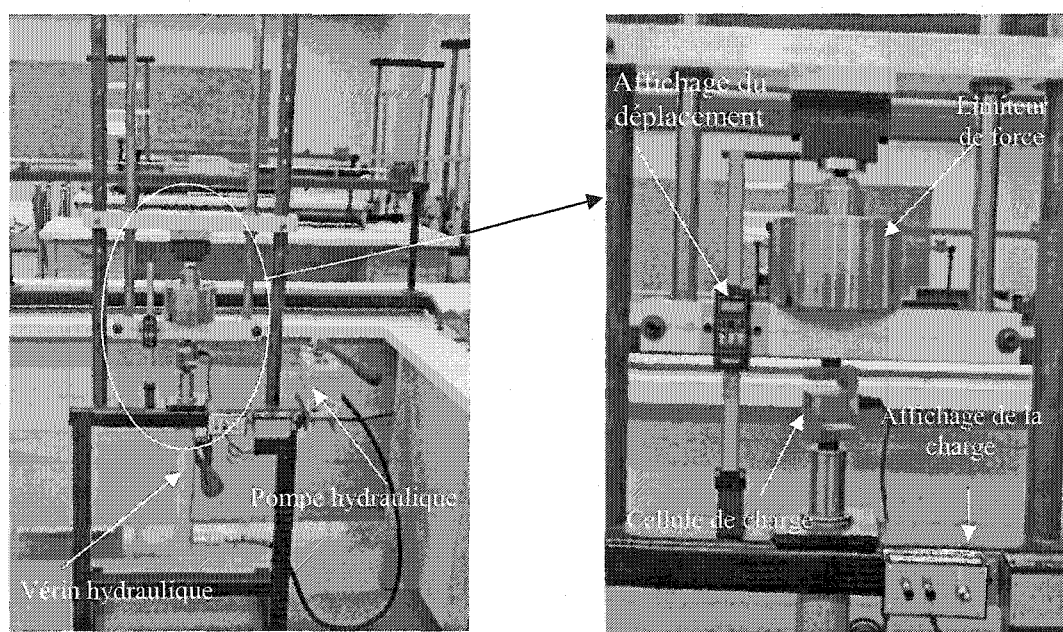


Figure 63 Montage utilisé pour le calibrage de l'appareil

### **Résultats des essais**

Dans le but de réaliser le calibrage du limiteur de force et de dresser les courbes des essais en vue d'une comparaison ultérieure avec les courbes de modélisation, les opérations suivantes doivent être effectuées :

- Placer le limiteur dans le montage;
- Faire le réglage du zéro de la cellule de charge;
- Faire le réglage du zéro du dispositif de mesure du déplacement (notons que ces deux dernières opérations induisent une source d'erreur dans le calibrage);
- Commencer l'essai de compression en agissant sur le levier de la pompe hydraulique du montage;
- Régler les ressorts verticaux en agissant sur les six vis situées au-dessus du limiteur jusqu'à l'obtention du bon réglage correspondant au dégagement complet de la rainure en V de la courbe théorique (notons que le réglage de ces ressorts doit se faire d'une manière uniforme pour les six vis);
- Varier la position du cône de réglage à l'aide de la vis située au-dessous du limiteur pour faire le réglage de la force maximale (qui vaut 300 kgf). Il est nécessaire de procéder à plusieurs essais jusqu'à atteindre la valeur voulue.

### **5.3 Correspondance des résultats des essais avec la modélisation**

Afin d'obtenir les courbes d'évolution de la force en fonction du déplacement des billes, nous avons pris une série de mesures en notant pour chaque fraction de déplacement de la partie mobile du limiteur de force, la charge affichée sur le cadran. Par la suite, nous avons mis les trois courbes des essais ayant comme charge maximale de 230, 300 et 360kgf, dans un même graphique que les courbes de modélisation théorique (voir figure 64).

La première chose que nous pouvons remarquer c'est le décalage qui existe entre les courbes au pour la distance parcourue pour atteindre la valeur maximale de force, ce décalage peut être évalué à peu près à 1,2 mm. Nous allons voir par la suite les causes probables qui sont à l'origine de ce décalage. Sinon, nous pouvons dire que l'écart qui existe entre les deux familles des courbes est d'une manière générale assez réduit, ce qui nous permet de se prononcer sur la bonne qualité et l'exactitude de la modélisation et des hypothèses prises.

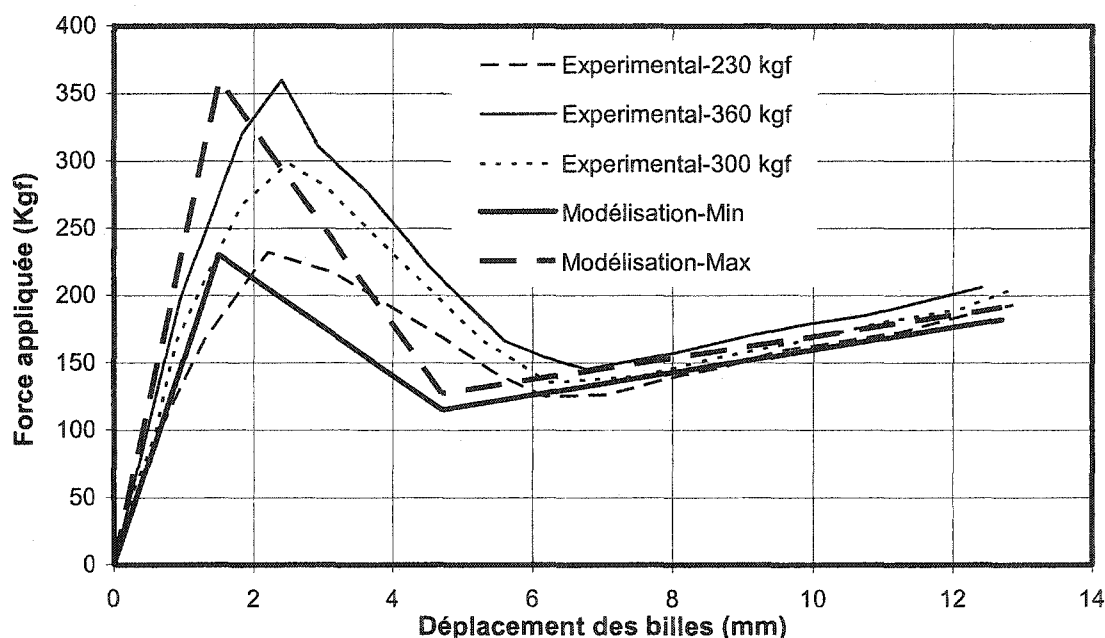


Figure 64 Courbes de modélisation & des essais

### Résultats des essais de répétabilité

Dans le but d'évaluer la capacité de l'appareil à reproduire les mêmes résultats pour un même réglage, nous avons effectué une série de 30 essais avec un réglage de la force maximale de  $F=300\text{kgf}$ . Pour chaque essai, nous avons noté la valeur du pic de la charge appliquée ce qui nous a permis d'avoir les résultats représentés dans la figure 65. Notons



que à peu près 90% des valeurs mesurées se trouvent dans un intervalle allant de 295 à 305 kgf.

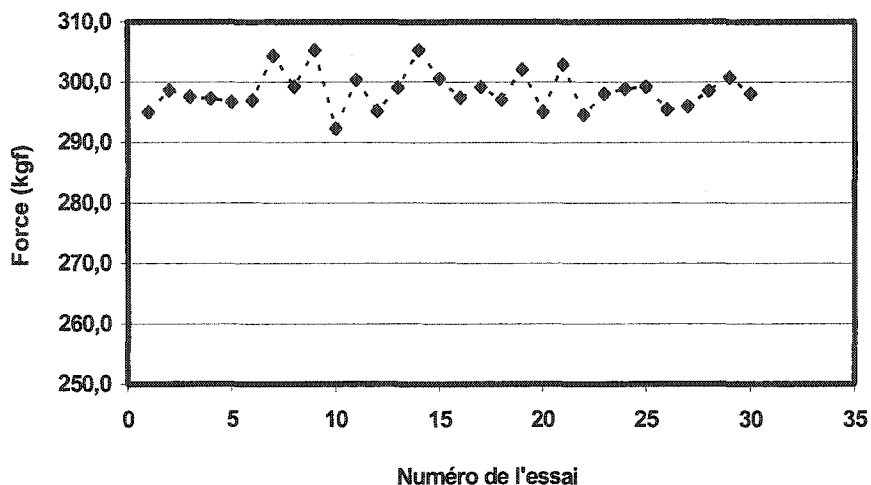


Figure 65 Valeurs des pics de la force des essais de répétabilité

L'ensemble des mesures des essais ont une moyenne de 298,5 kgf et un écart type de : 3,18 kgf, ce qui nous permet de dire que pour ce réglage, la valeur de la force de pic est  $F=298,5 \pm 6,2$  kgf avec un niveau de confiance de 95%. La dispersion des valeurs des forces maximales fera l'objet d'une étude détaillée dans la section 5.4.3.

#### 5.4 Sources et calcul des erreurs

Les travaux de mesure, calibrage ou étalonnage, font intervenir très souvent la notion d'incertitude de la valeur mesurée par rapport à la valeur réelle. D'après L. Lamarche (2001), les erreurs expérimentales peuvent être séparées en deux principales catégories :

- Systématiques
- Aléatoires

Une erreur aléatoire va faire que plusieurs mesures de notre système vont varier autour d'une valeur moyenne, tandis que l'erreur systématique tend à biaiser la mesure de façon spécifique et toujours dans le même sens. La figure 66 montre l'effet de chacun des deux types d'erreurs d'après L. Lamarche (2001).

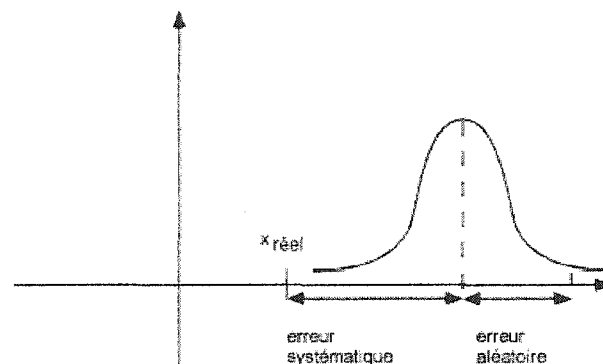


Figure 66 : Erreurs systématiques et aléatoires par rapport à la valeur réelle

#### 5.4.1 Erreurs systématiques

Dans ce type d'erreur, nous allons évaluer chacune des sources d'erreurs qui a affecté nos résultats, essentiellement au niveau de la correspondance avec les courbes de modélisation et les courbes expérimentales.

##### Erreur de réglage du zéro

Quand nous commençons à faire le calibrage du limiteur de force, la première étape est le réglage du zéro du dispositif de mesure de déplacement. Cette opération s'effectue manuellement d'où le risque d'introduire un certain défaut de quelques dixièmes de millimètre (environ 0,2 à 0,5 mm). D'ailleurs c'est l'une des raisons du décalage observé

entre les courbes de modélisations et les courbes expérimentales. Le réglage du zéro de l'afficheur de la force s'effectue automatiquement en appuyant sur un bouton approprié.

### **Erreur due au rattrapage du jeu**

Dès que nous appliquons la force, la partie mobile du limiteur commence à se déplacer. Ceci n'implique pas forcément le déplacement des billes car il y a un rattrapage du jeu qui se produit dans la direction verticale. Ce jeu correspond à l'ensemble des jeux fonctionnels qui existent entre les différentes pièces. Notons que ce jeu, qui ne dépasse pas 0.4 mm, n'a pas été pris en considération dans les courbes de modélisation. Cette source d'erreur est une autre raison du décalage que nous avons trouvé entre les courbes de modélisations et les courbes expérimentales.

### **Erreur due aux empreintes causées par les six billes**

Une dernière source qui est à l'origine du décalage entre les courbes de modélisation et les courbes expérimentales, sont les empreintes créées sur la pièce contenant la rainure en V, à cause des forces exercées sur les six billes par les ressorts horizontaux qui ont une très grande rigidité, la figure 67 illustre cette situation.

Connaissant la dureté de la pièce qui contient la rainure en V, qui est de 20 HRC (acier AISI 4140) et la valeur maximale de force qui peut être appliquée par les ressorts horizontaux, nous avons calculé le diamètre ( 0,5 mm) et la profondeur des empreintes.

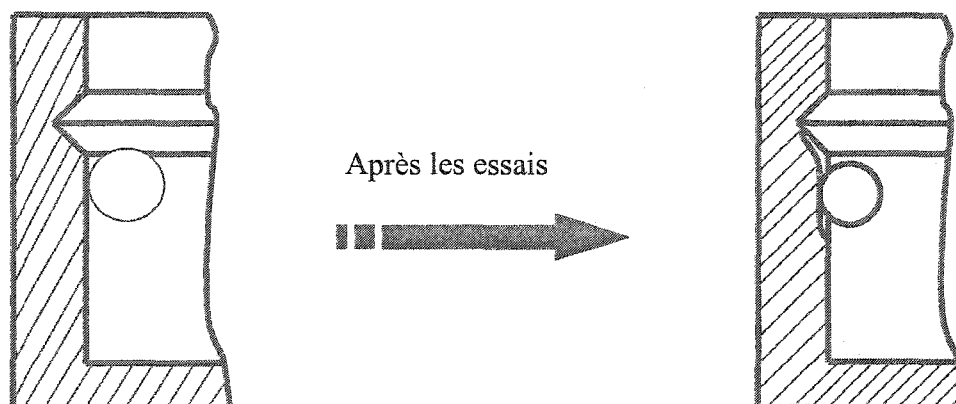


Figure 67 Empreinte crée suite aux essais

Pour mieux voir l'impact des empreintes causées par les six billes, nous avons réalisé des essais de compression du limiteur de force à l'aide de la machine MTS 810 pour trois réglages (230, 300 et 360 kgf). Ces essais nous permettant d'avoir plus de précision au niveau des courbes de la variation de la force en fonction du déplacement. La figure 68 nous montre la différence entre les courbes de modélisation et les courbes réelles pour la partie qui correspond à la sortie des billes de la rainure en V dont l'angle a été arrondi à cause de la force exercée par les billes.

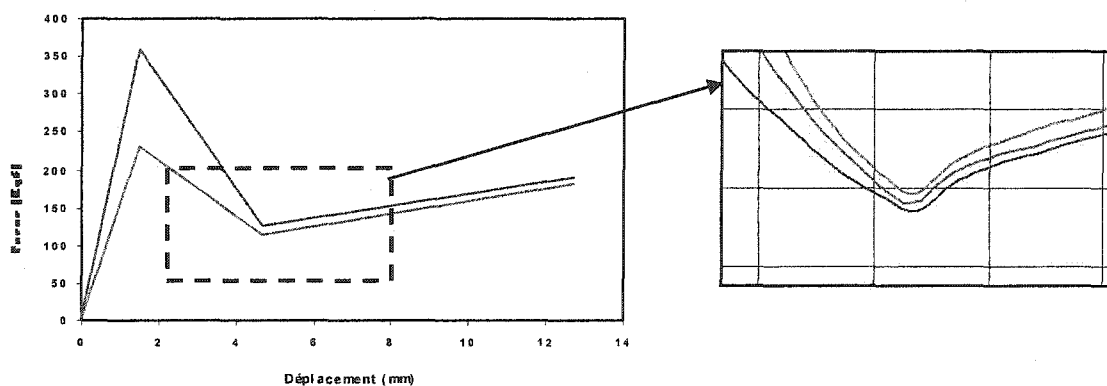


Figure 68 Variation des courbes suite aux essais

### 5.4.2 Erreurs aléatoires

Pour ce type d'erreur, nous allons évaluer chacune des sources d'erreurs qui ont affecté nos résultats, essentiellement les défauts de répétabilité afin de trouver les causes qui font que nous ne retrouvons pas exactement la même valeur de la force maximale à chaque essai pour un même réglage.

#### Erreur due à l'équipement

La cellule de charge et le système de l'affichage de la force du montage utilisé (voir figure 63) pour le calibrage et les essais de répétabilité comportent une erreur intrinsèque qui est estimée à environ  $\pm 3$  kgf.

#### Erreur due à la vitesse d'application de la force

Une autre source d'erreur aléatoire est la vitesse d'application de la charge. En effet, nous avons remarqué que on appliquant la force plus rapidement, la valeur maximale de la fore affichée a tendance à être un peu au-dessous de la moyenne. Dans le cas contraire, cette valeur est un peu au-dessus de la moyenne. Puisque nous n'avons aucun mécanisme qui contrôle la vitesse sur notre appareil, alors les petites variations de la force sont aléatoires et ne dépendent que de la personne qui agit sur le levier. Cette erreur a une variation évaluée selon les essais à :  $\pm 5$  kgf.

#### Erreurs dues au guidage

Dépendamment du jeu qui existe entre les pièces fixes et les pièces mobiles, nous pouvons détecter une autre source d'erreur reliée au problème de guidage. Un ajustement juste glissant doit être prévu pour s'assurer que les pièces mobiles ne peuvent pas bouger dans les directions non désirées. Ainsi, nous pouvons garantir une meilleure répétabilité.

### 5.4.3 Effet de l'ensemble des erreurs

L'effet de l'ensemble des types d'erreurs déjà mentionnées sur les résultats finals se limite aux erreurs de répétabilité qui sont du type aléatoire. Connaissant les défauts de répétabilité avec un certain niveau de confiance, nous allons calculer l'impact dû à la variation de valeur maximale de la charge du limiteur de force sur les diamètres des empreintes. En transformant l'équation (3.1), on peut déduire l'expression du diamètre de l'empreinte en fonction de la charge, la dureté HB et le diamètre de la bille. On obtient donc :

$$d = \sqrt{D^2 - \left( \frac{\pi \cdot HB \cdot D^2 - 2 \cdot P}{\pi \cdot HB \cdot D} \right)} \quad (5.1)$$

Nous avons trouvé que  $F = 298,5 \pm 6,2$  kgf. Faisons le calcul du diamètre de l'empreinte  $d$  avec les données suivantes :

$$D = 3,175 \text{ mm}$$

$$HB = 249 \text{ (dureté requise pour un boulon grade 5)}$$

Ainsi on trouve :

$$d = 1.21 \pm 0.012 (\pm 1\%) \text{ mm}$$

Ceci nous permet de dire que nous avons une très bonne précision pour les diamètres des empreintes malgré les petits défauts de répétabilité.

### 5.5 Expérimentation et essais de validation du prototype par le client

Suite à le calibrage du limiteur de force à la valeur désiré (300 kgf), nous avons monté ce dernier sur la structure servant à l'application de la charge afin de prendre des essais pour valider les résultats et de s'assurer de leur qualité (voir figure 69). En effectuant des essais sur beaucoup d'échantillons, nous avons trouvé que les résultats obtenus correspondent à ceux prévus au cours des phases de conception et de modélisation.

Ainsi, lors de notre dernière réunion chez TransÉnergie, les responsables de la compagnie ont été très satisfaits des résultats obtenus avec notre prototype.

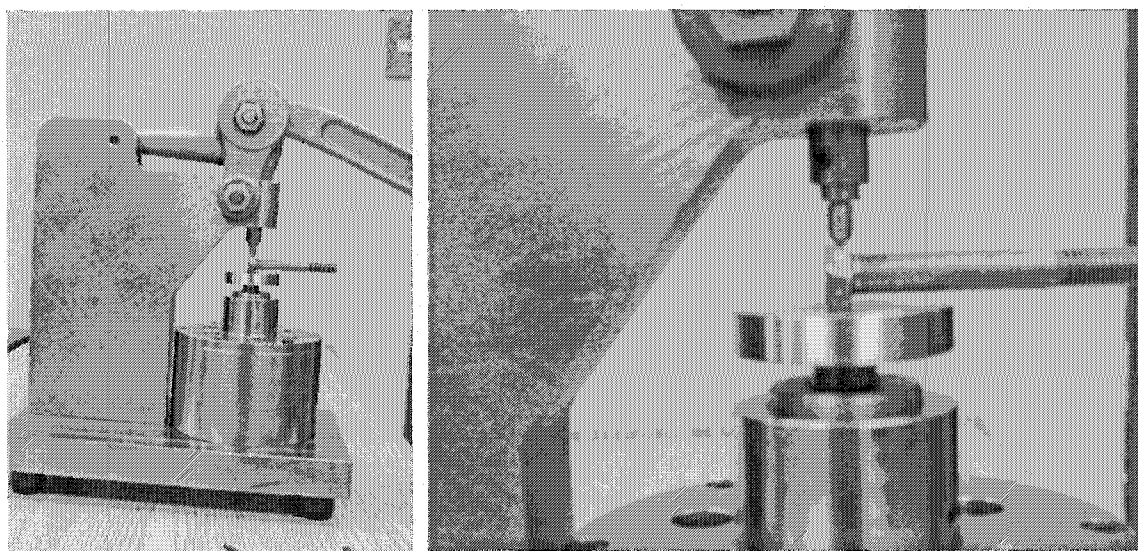


Figure 69 Essais de validation de l'appareil après calibrage

## 5.6 Fiabilité de l'appareil conçu

Tel que conçu, cet appareil doit avoir une très bonne fiabilité et une très longue durée de vie. Cependant il y a certains points qui nécessitent une attention particulière lors de son utilisation au fil des ans :

- Le changement de la bille qui sert à effectuer les essais de dureté dépendamment du nombre d'essais réalisés
- Le graissage des pièces qui sont en mouvement pour minimiser au maximum l'usure mécanique
- Vérifier périodiquement la force maximale appliquée par l'appareil, si c'est nécessaire, faire une nouvelle calibration
- Le changement des ressorts selon la durée de vie préconisée par le constructeur de ces derniers :
  - Pour les ressorts horizontaux (die springs), le nombre de cycles pendant la durée de vie est de : 300 000 cycles. Pour une utilisation moyenne de 50 fois par jour, il faut changer ces ressorts après 17 ans.
  - Pour les ressorts verticaux, le nombre de cycles pendant la durée de vie est de : 5 000 000 cycles. Pour une utilisation moyenne de 50 fois par jour, il faut changer ces ressorts après des centaines d'années. Ainsi nous pouvons dire que ces ressorts ont une durée de vie infinie.



## 5.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons vu la partie cruciale du projet qui consistait à faire les essais et à valider les résultats du prototype réalisé. Les résultats ont été très satisfaisants. Cependant, il est important de mentionner que notre appareil peut subir plus de perfectionnement et d'optimisation essentiellement pour les trois points suivants :

- Réduction des dimensions surtout pour la structure qui sert à l'application de la force. Notons que pour ce premier prototype, nous avons été assez conservateurs.
- Révision du matériau de la pièce contenant la rainure en V (même les traitements thermiques classiques ne changent pas d'une façon significative la taille des empreintes créées par les billes sur l'acier AISI 4140).
- Réduction des jeux fonctionnels, en prévoyant des ajustements plus adéquats car c'est une tâche décisive pour la précision de l'appareil.

## CONCLUSION

L'objectif global de ce mémoire était de synthétiser toutes les étapes qui ont permis d'aboutir à la livraison d'un appareil destiné à être intégré dans une application industrielle concrète; c'est-à-dire la conception d'un appareil de dureté de type Brinell, actionné à l'aide d'un système de levier, ce qui lui procure une facilité d'utilisation.

Notre mandat a été rempli et le prototype proposé permet d'améliorer la situation actuelle relative à la boulonnerie, situation qui présente beaucoup d'inconvénients dans les postes de TransÉnergie.

Pour réaliser des essais de dureté avec cet appareil, l'opérateur n'a pas besoin de grandes qualifications techniques ou physiques.

L'appareil conçu est doté d'une excellente précision, grâce à la très bonne répétabilité (écart type de : 3,18 kgf, pour une valeur moyenne de : 298,5 kgf). Ainsi, l'impact des défauts de répétabilité sur les diamètres des empreintes ne dépasse pas 1% sur l'incertitude des résultats.

Il y a lieu de souligner que les travaux entrepris au cours de ce projet peuvent être poursuivis et achevés sur différents aspects comme il est indiqué ci-après dans les recommandations.

## RECOMMANDATIONS









Le travail entrepris dans ce projet peut être poursuivi et approfondi dans d'éventuels travaux futurs. Il faut tout de même souligner les possibilités d'apporter des améliorations et des perfectionnements sur l'appareil conçu. En plus, certaines recherches complémentaires méritent d'être effectuées, surtout dans le sens d'élargir les possibilités d'identification incluant en plus de la boulonnerie en acier ordinaire, celle en acier inoxydable (cette dernière catégorie de boulonnerie est couramment utilisée par notre client). Quelques recommandations pertinentes en vue d'un élargissement et d'un approfondissement du présent projet s'énoncent comme suit :













- Optimiser et réduire les dimensions du prototype réalisé.
- Prévoir un mécanisme qui permet de garder une même vitesse de l'application de la charge avec le système du levier.
- Réduire la taille des empreintes causées par les six billes, en prévoyant un matériau plus dur pour la pièce qui contient la rainure en V.
- Rendre l'identification des tailles d'empreintes plus facile, en utilisant un comparateur optique ayant des marquages personnalisés (plus adaptés à notre type d'applications).
- Continuer à chercher d'éventuelles formes de pénétrateurs, capables de faciliter la distinction entre les grades.















## **ANNEXE 1**











**Marquages des grades selon les normes ASTM, ISO et SAE**

### ASTM, SAE AND ISO GRADE MARKINGS AND MECHANICAL PROPERTIES FOR STEEL FASTENERS ( SCREWS )







Identification Grade Mark	Specification	Fastener Description	Material	Nominal Size Range (in.)	Mechanical Properties		
					Proof Load (psi)	Yield Strength Min (psi)	Tensile Strength Min (psi)
 No Grade Mark	SAE J429 Grade 1	Bolts, Screws, Studs	Low or Medium Carbon Steel	1/4 thru 1-1/2	33,000	36,000	60,000
	ASTM A307 Grades A&B		Low Carbon Steel	1/4 thru 4	--	--	
	SAE J429 Grade 2		Low or Medium Carbon Steel	1/4 thru 3/4 Over 3/4 to 1- 1/2	55,000 33,000	57,000 36,000	74,000 60,000
 No Grade Mark	SAE J429 Grade 4	Studs	Medium Carbon Cold Drawn Steel	1/4 thru 1-1/2	--	100,000	115,000
 B5	ASTM A193 Grade B5		AISI 501	1/4 Thru 4	--	80,000	100,000
 B6	ASTM A193 Grade B6		AISI 410			85,000	110,000
 B7	ASTM A193 Grade B7		AISI 4140, 4142, OR 4105	1/4 thru 2-1/2 Over 2- 1/2 thru 4	--	105,000 95,000 75,000	125,000 115,000 100,000
 B16	ASTM A193 Grade B16		CrMoVa Alloy Steel	Over 4 thru 7	--	105,000 95,000 85,000	125,000 115,000 100,000
 B8	ASTM A193 Grade B8		AISI 304	1/4 and larger	--	30,000	75,000
 B8C	ASTM A193 Grade B8C		AISI 347				

 B8M	ASTM A193 Grade B8M		AISI 316				
 B8T	ASTM A193 Grade B8T		AISI 321	1/4 and larger	--	30,000	75,000
 B8	ASTM A193 Grade B8	Bolts, Screws, Studs for High- Temperature Service	AISI 304 Strain Hardened	1/4 thr 3/4 Over 3/4 thru 1 Over 1 thru 1-1/4 Over 1- 1/4 thru 1-1/2	-- -- -- --	100,000 80,000 65,000 50,000	125,000 115,000 105,000 100,000
 B8C	ASTM A193 Grade B8C		AISI 347 Strain Hardened				
 B8M	ASTM A193 Grade B8M		AISI 316 Strain Hardened			95,000 80,000 65,000 50,000	110,000 100,000 95,000 90,000
 B8T	ASTM A193 Grade B8T		AISI 321 Strain Hardened			100,000 80,000 65,000 50,000	125,000 115,000 105,000 100,000
 L7	ASTM A320 Grade L7		AISI 4140, 4142 or 4145				
 L7A	ASTM A320 Grade L7A		AISI 4037				
 L7B	ASTM A320 Grade L7B	Bolts, Screws, Studs for Low- Temperature Service	AISI 4137	1/4 thru 2-1/2	--	105,000	125,000
 L7C	ASTM A320 Grade LC7		AISI 8740				
 L43	ASTM A320 Grade L43		AISI 4340	1/4 thru 4	--	105,000	125,000
 B8	ASTM A320 Grade B8	Bolts, Screws, Studs for	AISI 304	1/4 and larger	--	30,000	75,000












	ASTM A320 Grade B8C	Low- Temperature Service	AISI 347				
	ASTM A320 Grade B8T		AISI 321				
	ASTM A320 Grade B8F		AISI 303 or 303Se				
	ASTM A320 Grade B8M		AISI 316				
	ASTM A320 Grade B8		AISI 304				
	ASTM A320 Grade B8C		AISI 347	1/4 thru 3/4			
	ASTM A320 Grade B8F		AISI 303 or 303Se	Over 3/4 thru 1	--	100,000	100,000
	ASTM A320 Grade B8M		AISI 316	Over 1 thru 1-1/4	--	80,000	80,000
	ASTM A320 Grade B8T		AISI 321	Over 1-1/4 thru 1-1/2	--	65,000	65,000
	ASTM A449		Medium Carbon Steel, Quenched and Tempered	Over 1-1/2 thru 3	--	50,000	50,000
	SAE J429 Grade 5	Bolts, Screws, Studs	Medium Carbon Steel, Quenched and Tempered	1/4 thru 1 Over 1 to 1-1/2	85,000 74,000	92,000 81,000	120,000 105,000
	SAE J429 Grade 5.1			1/4 thru 1 Over 1 to 1-1/2	85,000 74,000	92,000 81,000	120,000 105,000
	SAE J429 Grade 5.1			Over 1-1/2 thru 3	55,000	58,000	90,000
	SAE J429 Grade 5.1	Sems	Low or Medium Carbon Steel, Quenched and Tempered	No. 6 thru 3/8	85,000	--	120,000



	SAE J429 Grade 5.2	Bolts, Screws, Studs	Low Carbon Martensitic Steel, Quenched and Tempered	1/4 thru 1	85,000	92,000	120,000
 A325	ASTM A325 Type 1	High Strength Structural Bolts	Medium Carbon Steel, Quenched and Tempered	1/2 thru 1 1-1/8 thru 1-1/2	85,000 74,000	92,000 81,000	120,000 105,000
 A325	ASTM A325 Type 2		Low Carbon Martensitic Steel, Quenched and Tempered	1/2 thru 1	85,000	92,000	120,000
 A325	ASTM A325 Type 3		Atmospheric Corrosion Resisting Steel, Quenched and Tempered	1/2 thru 1 1-1/8 thru 1-1/2	85,000 74,000	92,000 81,000	120,000 105,000
 BB	ASTM A354 Grade BB	Bolts, Studs	Alloy Steel, Quenched and Tempered	1/4 thru 2-1/2 2-3/4 thru 4	80,000 75,000	83,000 78,000	105,000 100,000
 BC	ASTM A354 Grade BC				105,000 95,000	109,000 99,000	125,000 115,000
	SAE J429 Grade 7	Bolts, Screws,	Medium Carbon Alloy Steel, Quenched and Tempered *	1/4 thru 1-1/2	105,000	115,000	133,000
	SAE J429 Grade 8	Bolts, Screws, Studs	Medium Carbon Alloy Steel, Quenched and Tempered	1/4 thru 1-1/2	120,000	130,000	150,000
	ASTM A354 Grade BD		Alloy Steel, Quenched and Tempered *				
 No Grade Mark	SAE J429 Grade 8.1	Studs	Medium Carbon Alloy or SAE 1041 Modified Elevated Temperature Drawn Steel	1/4 thru 1-1/2	120,000	130,000	150,000
 A490	ASTM A490	High Strength Structural Bolts	Alloy Steel, Quenched and Tempered	1/2 thru 1-1/2	120,000	130,000	150,000 min 170,000 max



 No Grade Mark	ISO R898 Class 4.6	Bolts, Screws, Studs	Medium Carbon Steel, Quenched and Tempered	All Sizes thru 1-1/2	33,000	36,000	60,000
 No Grade Mark	ISO R898 Class 5.8				55,000	57,000	74,000
8.8  or  88	ISO R898 Class 8.8		85,000		92,000	120,000	
10.9  or  109	ISO R898 Class 10.9		120,000		130,000	150,000	

## FASTENER IDENTIFICATION MARKING ( NUTS )

Grade Identification Marking	Specification	Material	Nominal Size In.	Proof Load Stress ksi	Hardness Rockwell		See Note
					Min	Max	
 No Mark	ASTM A563 - Grade 0	Carbon Steel	1/4 thru 1-1/2	69	B55	C32	3,4
	ASTM A563 - Grade A	Carbon Steel	1/4 thru 1-1/2	90	B68	C32	3,4
	ASTM A563 - Grade B	Carbon Steel	1/4 thru 1	120	B69	C32	3,4
			over 1 thru 1-1/2	105			
	ASTM A563 - Grade C	Carbon Steel May be Quenched and Tempered	1/4 thru 4	144	B78	C38	5
	ASTM A563 - Grade C3	Atmospheric Corrosion Resistant Steel May be Quenched and Tempered	1/4 thru 4	144	B78	C38	5,9
	ASTM A563 - Grade D	Carbon Steel May be Quenched and Tempered	1/4 thru 4	150	B84	C38	6
	ASTM A563 - Grade DH	Carbon Steel Quenched and Tempered	1/4 thru 4	175	C24	C38	6
	ASTM A563 - Grade DH3	Atmospheric Corrosion Resistant Steel, Quenched and Tempered	1/4 thru 4	175	C24	C38	5,9
	ASTM A194 - Grade 1	Carbon Steel	1/4 thru 4	130	B70	--	7
	ASTM A194 - Grade 2	Medium Carbon Steel	1/4 thru 4	150	159	352	7,8
	ASTM A194 - Grade 2H	Medium Carbon Steel, Quenched and Tempered	1/4 thru 4	175	C24	C38	7
	ASTM A194 - Grade 2HM	Medium Carbon Steel, Quenched and Tempered	1/4 thru 4	150	159	237	7,8
	ASTM A194 - Grade 4	Medium Carbon Alloy Steel, Quenched and Tempered	1/4 thru 4	175	C24	C38	7

	ASTM A194 - Grade 7	Medium Carbon Alloy Steel, Quenched and Tempered	1/4 thru 4	175	C24	C38	7
	ASTM A194 - Grade 7M	Medium Carbon Alloy Steel, Quenched and Tempered	1/4 thru 4	150	159	237	7
See Note 1,2	10						

**NOTES:**

1. In addition to the indicated grade marking, all grades, except A563 grades O, A and B, must be marked for manufacturer identification.
2. The markings shown for all grades of A194 nuts are for cold formed and hot forged nuts. When nuts are machined from bar stock the nut must be additionally marked with the letter 'B'.
3. Nuts are not required to be marked unless specified by the purchaser. When marked, the identification marking shall be the grade letter O, A or B.
4. Properties shown are those of nonplated or noncoated coarse thread hex nuts.
5. Properties shown are those of coarse thread heavy hex nuts.
6. Properties shown are those of coarse thread heavy hex nuts.
7. Properties shown are those of coarse 8-pitch thread heavy hex nuts.
8. Hardnesses are Brinell Hardness Numbers.
9. The nut manufacturer, at his option, may add other markings to indicate the use of atmospheric corrosion resistant steel.
10. Specifications --  
 ASTM A563 -- Carbon and Alloy Steel Nuts.  
 ASTM A194/A194M -- Carbon and Alloy Steel Nuts for Bolts for High Pressure and High Temperature

## **ANNEXE 2**

### **Développement limité de la relation (1.14)**

Le rapport  $HM/HB$  donne :

$$\frac{HM}{HB} = \frac{4 \cdot F \cdot 0,102}{\pi \cdot d^2} \cdot \frac{\pi \cdot D \cdot (D - \sqrt{D^2 - d^2})}{2 \cdot 0,102 \cdot F} = 2 \cdot \left(\frac{D}{d}\right)^2 \cdot \left(1 - \sqrt{1 - \frac{d^2}{D^2}}\right)$$

Considérant  $d$  très petit devant  $D$ , l'expression peut être simplifiée à l'aide d'un développement limité à l'ordre 2 du type  $(1+x)^\alpha = 1 + \alpha \cdot x + \frac{\alpha \cdot (\alpha-1)}{2} \cdot x^2$ , ce qui donne ici : ( $\alpha = 1/2$ )

$$\sqrt{1 - \frac{d^2}{D^2}} = 1 - \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{d}{D}\right)^2 + \left(-\frac{1}{8}\right) \cdot \left(\frac{d}{D}\right)^4$$

d'où :

$$\left(1 - \sqrt{1 - \frac{d^2}{D^2}}\right) = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{d}{D}\right)^2 + \frac{1}{8} \cdot \left(\frac{d}{D}\right)^4$$

soit :

$$\frac{HM}{HB} = 2 \cdot \left(\frac{D}{d}\right)^2 \cdot \left[\frac{1}{2} \cdot \left(\frac{d}{D}\right)^2 + \frac{1}{8} \cdot \left(\frac{d}{D}\right)^4\right] = \left(\frac{D}{d}\right)^2 \cdot \left[\left(\frac{d}{D}\right)^2 + \frac{1}{4} \cdot \left(\frac{d}{D}\right)^4\right]$$

finalemt :

$$\frac{HM}{HB} \approx 1 + \frac{1}{4} \cdot \left(\frac{d}{D}\right)^2$$

## **ANNEXE 3**

### **Résultats des essais de dureté (Rockwell) sur les vis et écrous**

**Résultats des mesures de dureté sur les écrous :**

Comparaison des valeurs de la dureté – qualité ordinaire

	Dureté HB - mesuré		HB norme ( SAE )	
	Moyenne	Ecart type	HB - Moy.	HB - Min - Max
<b>Gr. 8</b>	203,00	5,77	300,00	247 - 353
<b>Gr. 5</b>	155,00	10,01	248,50	144 - 353
<b>Gr. 2</b>	153,00	3,00	212,00	123 - 301

Comparaison des valeurs de la dureté – qualité supérieure

	Dureté HB - mesuré		HB norme ( SAE )	
	Moyenne	Ecart type	HB - Moy.	HB - Min - Max
<b>Gr. 8</b>	247,00	6,93	300,00	247 - 353
<b>Gr. 5</b>	183,00	2,31	248,50	144 - 353
<b>Gr. 2</b>	182,00	9,60	212,00	123 - 301

### Résultats des mesures de dureté sur les vis:

Comparaison des valeurs de la dureté – qualité ordinaire

	Dureté HB mesuré		HB norme ( SAE )	
	Moyenne	Ecart type	HB - Moy.	HB - Min - Max
<b>Gr. 8</b>	315	3,46	337	311 - 362
<b>Gr. 5</b>	262	3,46	286	253 - 319
<b>Gr. 2</b>	211	4,16	195	150 - 240

Comparaison des valeurs de la dureté – qualité supérieure

	Dureté HB - mesuré		HB norme ( SAE )	
	Moyenne	Ecart type	HB - Moy.	HB - Min - Max
<b>Gr. 8</b>	317	3,46	337	311 - 362
<b>Gr. 5</b>	249	6,03	286	253 - 319
<b>Gr. 2</b>	193	2,89	195	150 - 240



## **ANNEXE 4**

**Programmes Matlab, Ressort.m & Final.m**

```

function
Final(Reglage_y,R,j,f,n,T10,alpha,beta,k1,Delta_total_1,L01,k2,Delta_total_2,L02)
%
% DETERMINATION DES PRINCIPALES CARACTERISTIQUES DES RESSORTS
%
% P : Force appliquée sur la bille (100 kg)
%
% Paramètres :
% Reglage_y : Distance verticale de prereglage de la pièce conique - Ressort 1 - (mm)
% R : Rayon de la bille utilisée (mm)
% j : jeu existant entre bati et pièce mobile
% f : coefficient de frottement
% n: ratio T2/T1 voulu au dernier point de contact
% T10 : Tension initiale du premier ressort (N)
% alpha : angle d'ouverture de la rainure (°)
% beta : demi-angle au sommet du cône (°)
% k1 : Raideur du premier ressort (N/mm)
% Delta_total_1 : Déflexion totale du premier ressort (mm)
% L01 : Longueur à vide du premier ressort(mm)
% k2 : Raideur du deuxième ressort (N/mm)
% Delta_total_2 : Déflexion totale du deuxième ressort (mm)
% L02 : Longueur à vide du deuxième ressort(mm)
% L02 : Longueur à vide du deuxième ressort(mm)
% Exemple : Final(4,4.3655,0.5,0.1,0.2,100,86,22.5,73.57,6,30,14.39,20.22,50.8)

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% CALCULS POUR LE PREMIER RESSORT

format short

% Valeur de la force P appliquée

P=60*9.81;
sprintf('La charge P vaut : %6.2f N',P)
sprintf('Caractéristiques du problème')
sprintf('Angle ouverture de la rainure, alpha : %6.2f degrés',alpha)
sprintf('Demi-angle au sommet du cône, beta : %6.2f degrés',beta)
sprintf('Raideur du premier ressort, k1 : %6.2f N/mm',k1)
sprintf('Delta total du premier ressort, Delta_total_1 : %6.2f mm',Delta_total_1)
sprintf('Longueur à vide du premier ressort, L01 : %6.2f mm',L01)
sprintf('Raideur du premier ressort, k2 : %6.2f N/mm',k2)

```

```
sprintf('Delta total du deuxieme ressort, Delta_total_2 : %6.2f mm',Delta_total_2)
sprintf('Longueur à vide du deuxieme ressort, L02 : %6.2f mm',L02)
```

```
% Détermination des déflexions successives
```

```
% a, distance du diamètre de la bille au bord de la pièce mobile, est fixé à 0,2*R
a=0.2*R;
```

```
Delta_x_initial=T10/k1;
```

```
Delta1_x=R*sin((alpha/2)*pi/180)-a-j;
```

```
Delta2_x=R*(1-sin((alpha/2)*pi/180));
```

```
Reglage_x=Reglage_y*tan(beta*pi/180);
```

```
% Evolution de la longueur du premier ressort
```

```
v=[1 2 3 4 5];
```

```
A=L01;
```

```
B=L01-Delta_x_initial;
```

```
C=L01-(Delta_x_initial+Delta1_x);
```

```
D=L01-(Delta_x_initial+Delta1_x+Delta2_x);
```

```
v=[A B C D];
```

```
sprintf('Evolution de la longueur du premier ressort, L1 : %6.2f %6.2f %6.2f %6.2f %6.2f mm',v(1),v(2),v(3),v(4))
```

```
% Evolution de la deflexion
```

```
A=0;
```

```
B=Delta_x_initial;
```

```
C=(Delta_x_initial+Delta1_x);
```

```
D=(Delta_x_initial+Delta1_x+Delta2_x);
```

```
w=[A B C D];
```

```
sprintf('Evolution de la deflexion du premier ressort, Delta1 : %6.2f %6.2f %6.2f %6.2f %6.2f mm',w(1),w(2),w(3),w(4))
```

```
figure (1)
```

```
plot (w,'-g')
```

```
xlabel(['Position du ressort dans le temps'])
```

```
ylabel('Evolution de la déflexion du premier ressort')
```

```
title('Reglage non pris en compte')
```

```
pause
```

```
% Evolution de la tension du premier ressort
```

```
A=k1*0;
```

```
B=k1*Delta_x_initial;
```

```
C=k1*(Delta_x_initial+Delta1_x);
```

```
D=k1*(Delta_x_initial+Delta1_x+Delta2_x);
```

```

z=[A B C D];
sprintf('Evolution de la tension du premier ressort, T1 : %6.2f %6.2f %6.2f %6.2f %6.2f
N',z(1),z(2),z(3),z(4))

figure (2)
plot (z,'-g')
xlabel(['Position du ressort dans le temps'])
ylabel('Evolution de la tension du premier ressort')
title('Reglage non pris en compte')
pause
close all

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% CALCULS POUR LE DEUXIEME RESSORT

% Détermination des déflexions successives
% a, distance du diamètre de la bille au bord de la pièce mobile, est fixé à 0,2*R
D=k1*(Delta_x_initial+Delta1_x+Delta2_x+Reglage_x);
T2_2=2*D*f;
Delta_y_initial=T2_2/k2;
Delta1_y=[R*sin((alpha/2)*pi/180)-a-j]*tan((alpha/2)*pi/180);
Delta2_y=8;

% Evolution de la longueur du deuxieme ressort

% Calcul de la largeur de la rainure
l=9.3773;
sprintf('Largeur de la rainure : %6.2f mm',l)

A=L02;
B=L02-Delta_y_initial;
C=L02-(Delta_y_initial+Delta1_y);
D=L02-(Delta_y_initial+l/2);
E=L02-(Delta_y_initial+l/2+Delta2_y);
v=[A B C D E];
sprintf('Evolution de la longueur du deuxieme ressort, L2 : %6.2f %6.2f %6.2f %6.2f
%6.2f mm',v(1),v(2),v(3),v(4),v(5))

% Evolution de la deflexion

A=0;
B=Delta_y_initial;

```

```

C=(Delta_y_initial+Delta1_y);
D=(Delta_y_initial+1/2);
E=(Delta_y_initial+1/2+Delta2_y);
w=[A B C D E];
sprintf('Evolution de la deflexion du deuxieme ressort, Delta2 : %6.2f %6.2f %6.2f
%6.2f %6.2f mm',w(1),w(2),w(3),w(4),w(5))

```

```

figure (3)
plot (w,'-g')
xlabel(['Position du ressort dans le temps'])
ylabel('Evolution de la deflexion du deuxieme ressort')
title('Reglage non pris en compte')
pause
% Evolution de la tension du premier ressort

```

```

A=k2*0;
B=k2*Delta_y_initial;
C=k2*(Delta_y_initial+Delta1_y);
D=k2*(Delta_y_initial+1/2);
E=k2*(Delta_y_initial+1/2+Delta2_y);
z=[A B C D E];
sprintf('Evolution de la tension du deuxieme ressort, T1 : %6.2f %6.2f %6.2f %6.2f
%6.2f N',z(1),z(2),z(3),z(4),z(5))

```

```

figure (4)
plot (z,'-g')
xlabel(['Position du ressort dans le temps'])
ylabel('Evolution de la tension du deuxieme ressort')
title('Reglage non pris en compte')
pause
close all

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

```

% Calcul de la largeur de la rainure
l=9.3773;
sprintf('Largeur de la rainure : %6.2f mm',l)

```

```

% Calcul de la profondeur de la rainure
p=1/(2*tan((alpha/2)*pi/180));
sprintf('Profondeur de la rainure : %6.2f mm',p)

```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
% Evolution de la charge appliquée en fonction de la position de la bille
```

```
x=[0 Delta1_y l/2 l/2+Delta2_y];
Delta=[Delta_y_initial Delta_y_initial+Delta1_y Delta_y_initial+l/2
Delta_y_initial+l/2+Delta2_y];
```

```
% Avant d'appliquer la charge
P1=0;
```

```
% Au point de contact
```

```
T1_a_sans_reglage=k1*(Delta_x_initial+Delta1_x);
m=[sin((alpha/2)*pi/180)-
f*cos((alpha/2)*pi/180)]/[cos((alpha/2)*pi/180)+f*sin((alpha/2)*pi/180)];
P2_sans_reglage=6*T1_a_sans_reglage/([(m-f)/(1+n*(m-f))]*9.81);
```

```
T1_a_avec_reglage=k1*(Delta_x_initial+Delta1_x+Reglage_x);
P2_avec_reglage=6*T1_a_avec_reglage/([(m-f)/(1+n*(m-f))]*9.81);
```

```
% A la sortie de la rainure x=l/2
T2_b=k2*Delta(3);
T1_b_sans_reglage=k1*(Delta_x_initial+Delta1_x+Delta2_x);
P3_sans_reglage=6*(T2_b+T1_b_sans_reglage*f)/9.81;
```

```
T1_b_avec_reglage=k1*(Delta_x_initial+Delta1_x+Delta2_x+Reglage_x);
P3_avec_reglage=6*(T2_b+T1_b_avec_reglage*f)/9.81;
```

```
% En bout de course de la bille
T2_c=k2*Delta(4);
P4_sans_reglage=6*(T2_c+T1_b_sans_reglage*f)/9.81;
P4_avec_reglage=6*(T2_c+T1_b_avec_reglage*f)/9.81;
```

```
q1=[P1 P2_sans_reglage P3_sans_reglage P4_sans_reglage];
q2=[P1 P2_avec_reglage P3_avec_reglage P4_avec_reglage];
```

```
figure (6)
plot (x,q1,'-g',x,q2,'-b')
xlabel(['Position de la bille'])
ylabel('Valeur de la charge appliquée P')
legend('Sans réglage','Avec réglage',0)
```



```

function ressort(Reglage_y,R,j,f,n,T10,u,beta,alpha)
%
% DETERMINATION DES PRINCIPALES CARACTERISTIQUES DES RESSORTS
%
% P : Force appliquée sur la bille (60 kg) - Prise en compte de 6 ressorts horizontaux
%
% Paramètres :
% Reglage_y : Distance verticale de prereglage de la pièce conique - Ressort 1 - (mm)
% R : Rayon de la bille utilisée (mm)
% j : jeu existant entre bati et pièce mobile
% f : coefficient de frottement
% n: ratio T2/T1 voulu au dernier point de contact
% T10 : Tension initiale du premier ressort (N)
% u : ratio à l'état initial entre T1 et T2 pour maintenir la bille
% beta : demi-angle au sommet du cône (°)
% alpha : angle d'ouverture de la rainure (°)
% k1 : Raideur du premier ressort (N/mm)
% Delta_total_1 : Déflexion totale du premier ressort (mm)
% k2 : Raideur du deuxième ressort (N/mm)
% Delta_total_2 : Déflexion totale du premier ressort (mm)
% T1_contact : Tension du premier ressort au dernier point de contact de la rainure (N)
% T1max : Tension maximale du premier ressort (bille sortie de la rainure) (N)
% T2 : Tension du deuxième ressort
% a : distance entre le diamètre de la bille et le bord de la pièce(mm)
% Delta_x_initial : deflexion initiale du ressort lors de l'installation - Ressort 1 - (mm)
% Delta1_x : deflexion au dernier point de contact - Ressort 1 - (mm)
% Delta2_x : deflexion une fois sorti de la rainure - Ressort 1 - (mm)
% Reglage_y : Distance verticale de prereglage de la pièce conique - Ressort 1 - (mm)
% Reglage_x : Deflexion du premier ressort du au prereglage par le cône - Ressort 1 -
(mm)
% Delta_y_initial : deflexion initiale du ressort lors de l'installation - Ressort 2 - (mm)
% Delta1_y : deflexion a la position de contact avec rainure - Ressort 2 - (mm)
% Delta2_y : course de la bille une fois sortie de la rainure 10 mm - Ressort 2 - (mm)
% Exemple : ressort(4,4.3655,0.5,0.1,0.2,100,1.05,22.5,86)

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% CALCULS POUR LE PREMIER RESSORT
clc
format short

```



```

% Valeur de la force P appliquée
P=60*9.81;
sprintf('La charge P vaut : %6.2f N',P);

% Estimation de la valeur de T1 au dernier point de contact
% On pose au dernier point de contact T2=0.2*T1
m=[sin((alpha/2)*pi/180)-
f*cos((alpha/2)*pi/180)]/[cos((alpha/2)*pi/180)+f*sin((alpha/2)*pi/180)];
T1_contact=P*[(m-f)/(1+n*(m-f))];

Reglage_x=Reglage_y*tan(beta*pi/180);

% Détermination de la deflexion entre longueur prereglée et dernier point de contact
% a, distance du diamètre de la bille au bord de la pièce mobile, est fixé à 0,2*R
a=0.2*R;
Delta1_x=R*sin((alpha/2)*pi/180)-a-j;

% Déflexion totale du ressort entre la position libre et le point de contact
Delta_intermediaire=Reglage_x+Delta1_x;

% Estimation de la raideur du ressort au point de contact
k1=(T1_contact-T10)/Delta_intermediaire;
sprintf('Raideur du premier ressort, k1 : %6.2f N/mm',k1)

% Déflexion du ressort a la sortie de la bille par rapport à la position de contact
Delta2_x=R*(1-sin((alpha/2)*pi/180));

% Détermination de la déflexion initiale du ressort lors de l'installation
Delta_x_initial=T10/k1;
sprintf('Deflexion initiale du premier ressort, Delta01 : %6.2f mm',Delta_x_initial)

% Détermination de la déflexion totale du ressort horizontal
Delta_total_1=Delta2_x+Delta_intermediaire+Delta_x_initial;
sprintf('Deflexion totale du premier ressort, Delta_total : %6.2f mm',Delta_total_1)

% Détermination de la tension maximale du ressort horizontal
T1max=k1*Delta_total_1;
sprintf('Tension maximale du premier ressort, T1max : %6.2f N',T1max);

% Vérification de la condition T10>2*T1max*f

Condition=u*(2*T1max*f)
if T10<Condition

```

```

    sprintf('Condition T10>2*T1max*f non respectée, prendre une nouvelle valeur de T10
plus grande')
    close all
    break
else
    sprintf('Condition T10>2*T1max*f respectée, la valeur de T10 convient au problème')
end

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

```

% CALCULS POUR LE DEUXIEME RESSORT - 6 RESSORTS VERTICAUX POUR
6 RESSORTS HORIZONTALS

```

```

Delta1_y=[R*sin((alpha/2)*pi/180)-a-j]*tan((alpha/2)*pi/180);

```

```

T2_1=n*T1_contact;

```

```

T2_2=2*T1max*f;

```

```

% Raideur du ressort vertical

```

```

k2=(T2_2-T2_1)/Delta1_y;

```

```

sprintf('Raideur du deuxieme ressort, k2 : %6.2f N/mm',k2)

```

```

% Détermination de la déflexion initiale du ressort lors de l'installation

```

```

Delta_y_initial=T2_2/k2;

```

```

sprintf('Deflexion initiale du deuxieme ressort, Delta02 : %6.2f mm',Delta_y_initial)

```

```

% Course totale de la bille sur le plan hors de la rainure

```

```

Delta2_y=8;

```

```

%l=2*R*cos((alpha/2)*pi/180)+Delta1_y;

```

```

l=9.3773;

```

```

sprintf('Largeur de la rainure : %6.2f mm',l)

```

```

p=l/(2*tan((alpha/2)*pi/180));

```

```

sprintf('Profondeur de la rainure : %6.2f mm',p)

```

```

%Détermination de Delta_total_2 du 2ème ressort

```

```

Delta_total_2=l/2+Delta_y_initial+Delta2_y;

```

```

sprintf('Deflexion totale du deuxieme ressort, Delta_total : %6.2f mm',Delta_total_2)

```

```

%Détermination de la tension maximale du 2ème ressort

```

```

T2max=k2*Delta_total_2;

```

```

sprintf('Tension maximale du deuxieme ressort, T2max : %6.2f N',T2max);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%Evolution de la charge appliquée en fonction de la position de la bille

x=[0 Delta1_y l/2 l/2+Delta2_y];
Delta=[Delta_y_initial Delta_y_initial+Delta1_y Delta_y_initial+l/2
Delta_y_initial+l/2+Delta2_y];

% Avant d'appliquer la charge
P1=0;

% Au point de contact

T1_a_sans_reglage=k1*(Delta_x_initial+Delta1_x);
m=[sin((alpha/2)*pi/180)-
f*cos((alpha/2)*pi/180)]/[cos((alpha/2)*pi/180)+f*sin((alpha/2)*pi/180)];
P2_sans_reglage=6*T1_a_sans_reglage/([(m-f)/(1+n*(m-f))]*9.81);

T1_a_avec_reglage=k1*(Delta_x_initial+Delta1_x+Reglage_x);
P2_avec_reglage=6*T1_a_avec_reglage/([(m-f)/(1+n*(m-f))]*9.81);

% A la sortie de la rainure x=l/2
T2_b=k2*Delta(3);
T1_b_sans_reglage=k1*(Delta_x_initial+Delta1_x+Delta2_x);
P3_sans_reglage=6*(T2_b+T1_b_sans_reglage*f)/9.81;

T1_b_avec_reglage=k1*(Delta_x_initial+Delta1_x+Delta2_x+Reglage_x);
P3_avec_reglage=6*(T2_b+T1_b_avec_reglage*f)/9.81;

% En bout de course de la bille
T2_c=k2*Delta(4);
P4_sans_reglage=6*(T2_c+T1_b_sans_reglage*f)/9.81;
P4_avec_reglage=6*(T2_c+T1_b_avec_reglage*f)/9.81;

q1=[P1 P2_sans_reglage P3_sans_reglage P4_sans_reglage];
q2=[P1 P2_avec_reglage P3_avec_reglage P4_avec_reglage];

figure (6)
plot (x,q1,'-g',x,q2,'-b')
xlabel(['Position de la bille'])
ylabel('Valeur de la charge appliquée P')

```

```
legend('Réglage minimum','Réglage maximum',0)  
pause  
close all
```

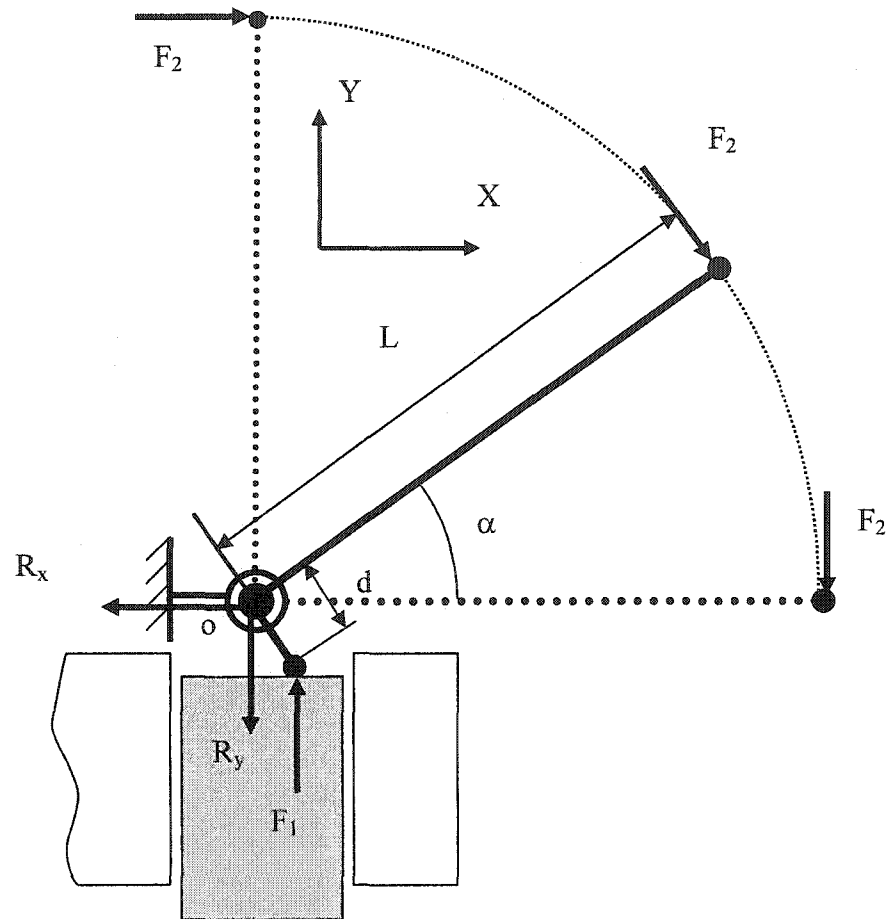
```
% FIN DU PROGRAMME
```

```
%%%%%%%%%%  
%%%%%%%%%
```

## **ANNEXE 5**

### **D.C.L du système levier**

Détermination des forces et réactions :  $F_2$ ,  $R_x$  et  $R_y$



DCL du mécanisme :

$$\sum M_{/O} = 0$$

$$F_1 \cdot d \cdot \sin(\alpha) - F_2 \cdot L = 0$$

Donc :

$$F_2 = \frac{F_1 \cdot d \cdot \sin(\alpha)}{L}$$

$$\sum F = 0, \text{ ainsi } \sum F_{/x} = 0$$

En faisant la projection sur l'axe des X on trouve :

$$F_2 \cdot \sin(\alpha) - R_x = 0$$

Donc :

$$R_x = F_2 \cdot \sin(\alpha)$$

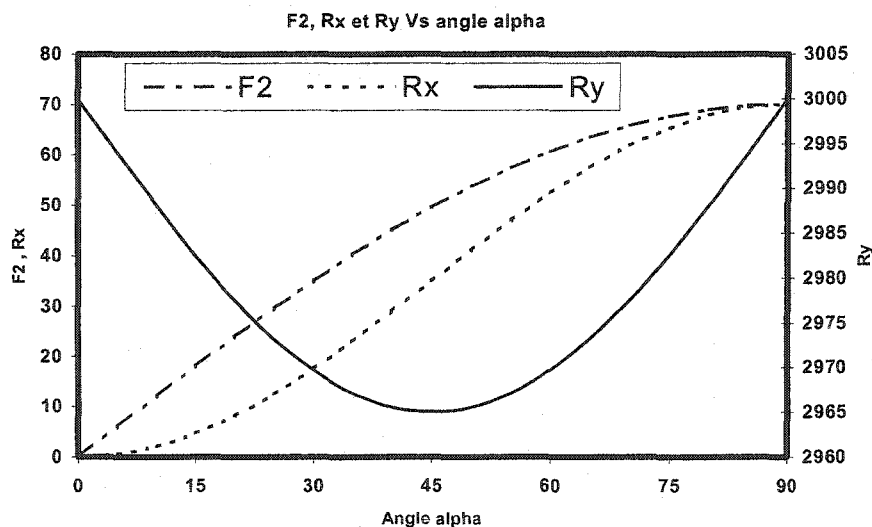
$$\text{Aussi } \sum F_{/y} = 0$$

En faisant la projection sur l'axe des Y on trouve :

$$-F_2 \cdot \cos(\alpha) - R_y + F_1 = 0$$

Donc :

$$R_y = F_1 - F_2 \cdot \cos(\alpha)$$



## **ANNEXE 6**

### **Programme Ansys**



! Etude de la déformation de la semelle

FINISH

/CLEAR,START

/TITLE,Analyse de déformation de la semelle

!-----

H=175 ! hauteur de la pièce

r=8 ! rayon du trou

L=300 ! longueur de la pièce

t=19 ! épaisseur de la pièce

P=3000 ! Force

pi=3.14159

!-----

/PREP7

ET,1,SOLID186

MP,EX,1,70000

MP,PRXY,1,0.33

!----- Géométrie -----

blc4,0,0,H/2,L,t

CM,plein,volu

cmsel,u,plein

CYL4,H/2,23,r,,,t

CYL4,H/2,118,r,,,t

CM,vide,volu

CMSEL,A,plein

cmsel,all

VSBV,plein,vide

CM,plaque,volu

CYL4,H/2,208,67, 90,25,270

VOFFST,1,t, ,

VOVLAP,1,4

vglue,all

VPLOT

MSHKEY,0

MSHAPE,1,3d

VSEL,all

SMRT,3

VMESH,all

finish

/solu

da,15,symm ; da,14,symm ; da,21,symm ;  
da,7,symm ; da,12,symm ; da,9,symm ; da,13,symm ;

da,17,all,0 ; da,18,all,0 ; da,19,uz,0;  
da,19,ux,0 ; da,20,uz,0 ; da,20,ux,0;

alls

sfa,1,1,pres,0.247

! F,node(87.5,208,19),FZ,-3000

/pbc,u,1

/pbc,f,1

solve

finish

/post1

PLNSOL,u,Z,0,1

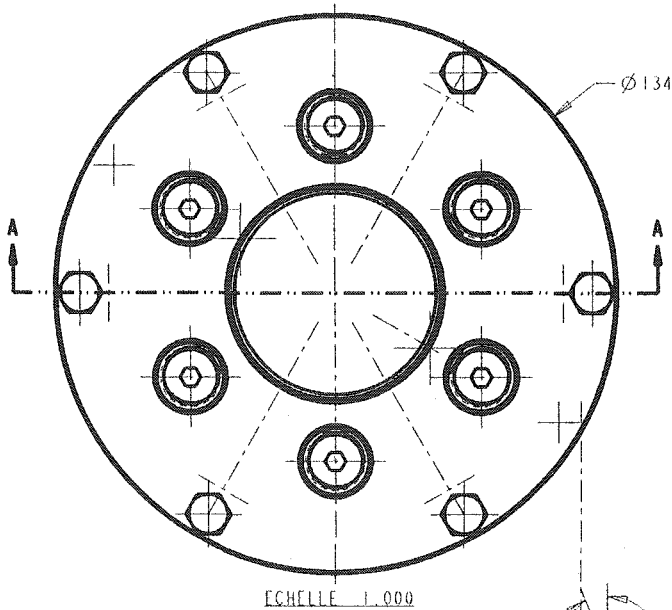
## **ANNEXE 7**

### **Feuille de sondage**

<b>FEUILLE DE SONDAGE N°0</b>						
<b>Réalisé le :</b> XX/YY/2003 <b>par :</b>						
<b>Nom :</b>						
<b>Fonction :</b>						
<b>Age :</b>						
<b>Question :</b> « Sur les deux empreintes que vous voyez, y en a-t-il une qui soit plus grande, identique ou plus petite que l'autre ? »						
<b>3 Réponses possibles :</b>						
a) Cette empreinte est plus grande que l'autre (ou plus petite que l'autre). b) Après le temps d'exposition, je ne vois pas. c) Elles sont identiques.						
<b>5 Cas :</b>						
<b>Réponse a) et c'est vrai :</b> L'empreinte indiquée est bien plus grande (ou plus petite) que l'autre.						
<b>Réponse a) et c'est faux :</b> L'empreinte indiquée n'est pas plus grande (ou plus petite) que l'autre.						
<b>Réponse b), on coche alors « Ne sait pas »</b>						
<b>Réponse c) et c'est vrai :</b> L'empreinte indiquée est identique à l'autre.						
<b>Réponse c) et c'est faux :</b> L'empreinte indiquée n'est pas identique à l'autre.						
<b>Expériences</b>	<b>(a)Vrai</b>	<b>(a)Faux</b>	<b>(b)NSP</b>	<b>(c)Vrai</b>	<b>(c)Faux</b>	
1 - 5a / 2a      11-7	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	11 < 7
2 - 5a / 2b      11-5	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	11 < 5
3 - 5a / 2c      11-4	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	11 < 4
4 - 5a / 5b      11-3	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	11 = 3
5 - 5a / 5c      11-1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	11 = 1
6 - 5b / 2a      3-7	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	3 < 7
7 - 5b / 2b      3-5	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	3 < 5
8 - 5b / 2c      3-4	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	3 < 4
9 - 5b / 5c      3-1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	3 = 1
10 - 5c / 2a      1-7	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	1 < 7
11 - 5c / 2b      1-5	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	1 < 5
12 - 5c / 2c      1-4	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	1 < 4
13 - 2a / 2b      7-5	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	7 = 5
14 - 2a / 2c      7-4	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	7 = 4
15 - 2b / 2c      5-4	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	5 = 4
<b>Total :</b>						
	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	
<b>Probabilité de détection :</b> <span style="float: right;"><b>0,00%</b></span>						
<b>Proba détection/les empreintes présentées sont différentes</b> <span style="float: right;"><b>0,00%</b></span>						
<b>Proba détection/les empreintes présentées sont identiques</b> <span style="float: right;"><b>0,00%</b></span>						

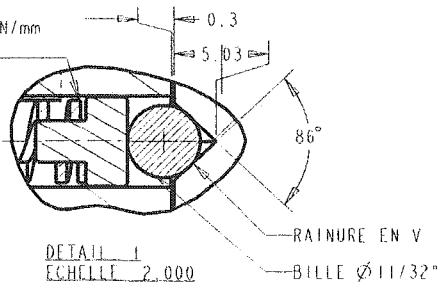
## **ANNEXE 8**

### **Dessins de fabrication**

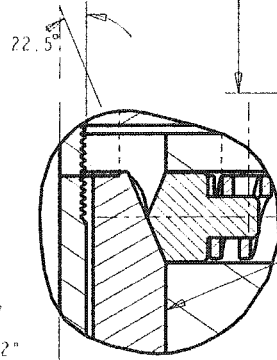


ECHELLE 1.000

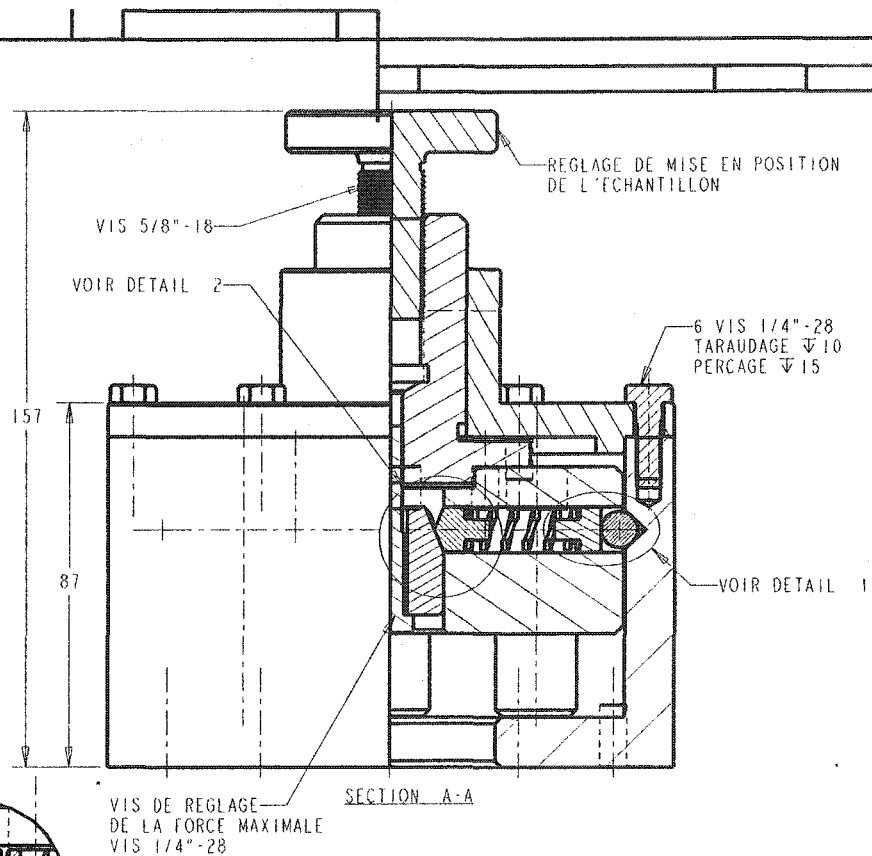
RESSORT  
k1 = 73,57 N/mm  
L01 = 30mm



DETAIL 1  
ECHELLE 2.000



DETAIL 2  
ECHELLE 2.000



VIS DE REGLAGE  
DE LA FORCE MAXIMALE  
VIS 1/4"-28

SECTION A-A

CONE DE REGLAGE

Tolérances (si non spécif)  
X : ±0.050  
XX : ±0.010  
XXX : ±0.005  
Frac : ±1/64  
Ang : ±1°

Université du Québec  
École de technologie supérieure  
Département de génie mécanique

Projet R0035

Dessin LIMITEUR DE FORCE

Sheet 1 of 3

Echelle 1.0

MTL

Dessinateur

M. DRIRA

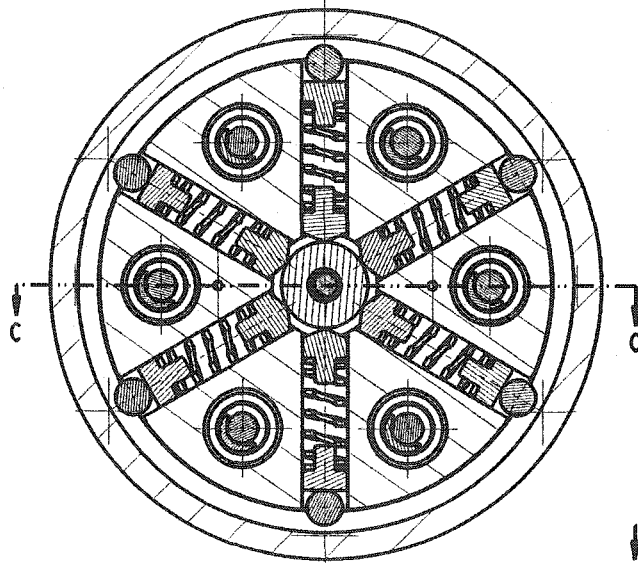
B

QTE 1

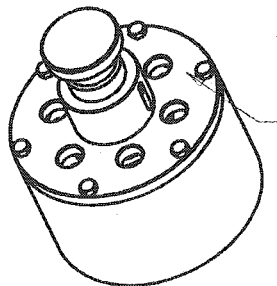
ACIER

28-Mar-03

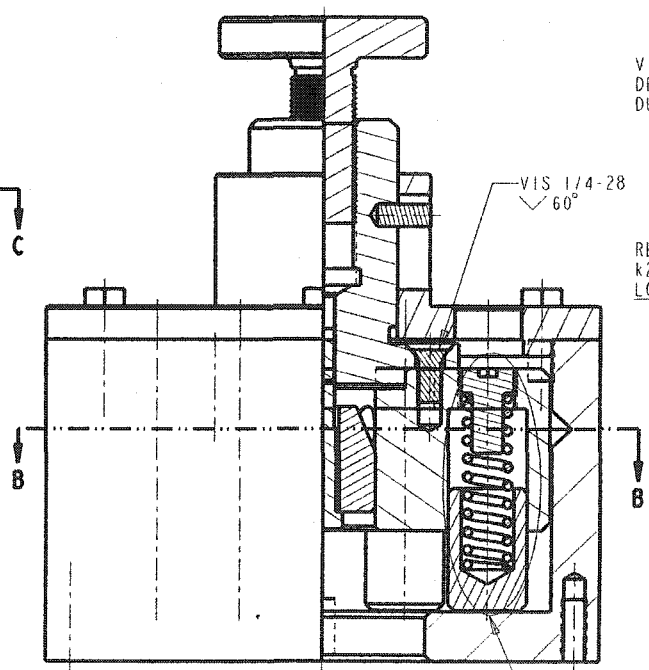
L'Université professe une égalité entre les sexes et encourage la participation de tous les étudiants et du personnel.  
No part may be reproduced or stored in a retrieval system without the written permission of the Université du Québec.



SECTION B-B  
ECHELLE 1.000



ECHELLE 0.400

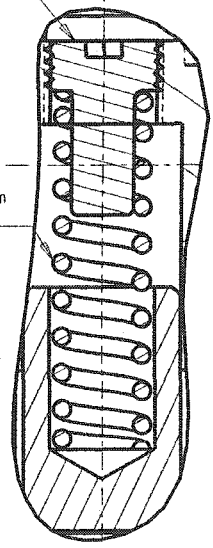


SECTION C-C  
ECHELLE 1.000

VIS 9/16"-24  
DE REGLAGE  
DU RESSORT

VIS 1/4-28  
60°

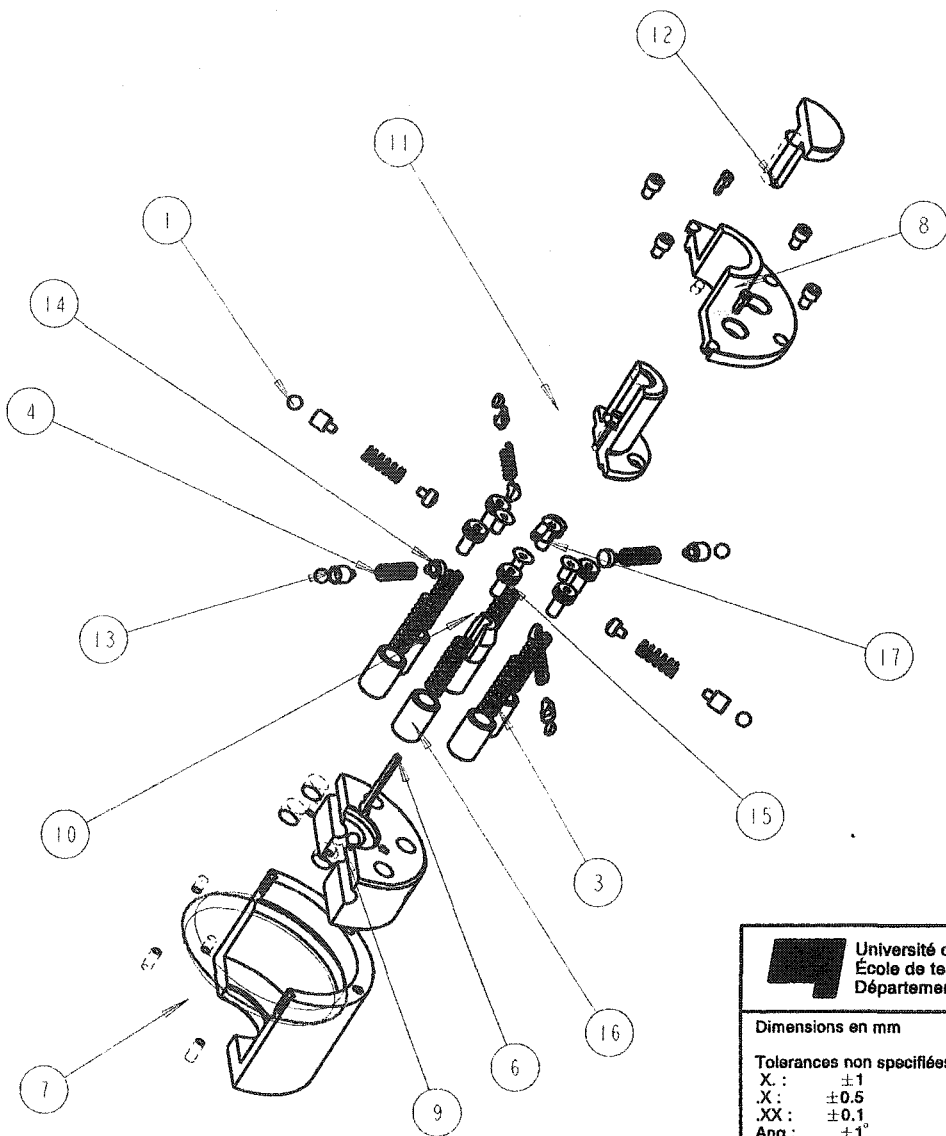
RESSORT  
k2=14.39N/mm  
L02=50.8mm



DETAIL 3  
ECHELLE 2.000

VOIR DETAIL 3

Tolérances (si non spécifié) X : $\pm 0.063$ XX : $\pm 0.010$ XXX : $\pm 0.005$ Frac : $\pm 1/64$ Ang : $\pm 1^\circ$	Université du Québec École de technologie supérieure Département de génie mécanique			
	L'information présentée sur cette notice est confidentielle et découle la propriété de l'École de Technologie Supérieure. Ne pas la divulguer en aucun cas ou en partie sans l'autorisation écrite de l'École de Technologie Supérieure.			
Projet R0035	Dessin LIMITEUR DE FORCE			
Sheet 2 of 3	MTL Dessinateur	M. DRIRA	B	
Echelle 1.0	QTE 1	ACIER	28-Mar-03	



ITEM	DESCRIPTION	QTY.
1	BILLE-8.731	6
2	CAP. SCREW_0.250X0.375	6
3	COMP. SPRING	6
4	DIE SPRING	6
5	FLAT HEAD_0.250X0.500	4
6	HEX BOLT_0.250X1.75	1
7	R0035-1-01	1
8	R0035-1-02	1
9	R0035-1-03	1
10	R0035-1-04	1
11	R0035-1-05	1
12	R0035-1-06	1
13	R0035-2-01	6
14	R0035-2-02	6
15	R0035-3-01	6
16	R0035-3-02	6
17	SET SCREW_M6X16MM	1

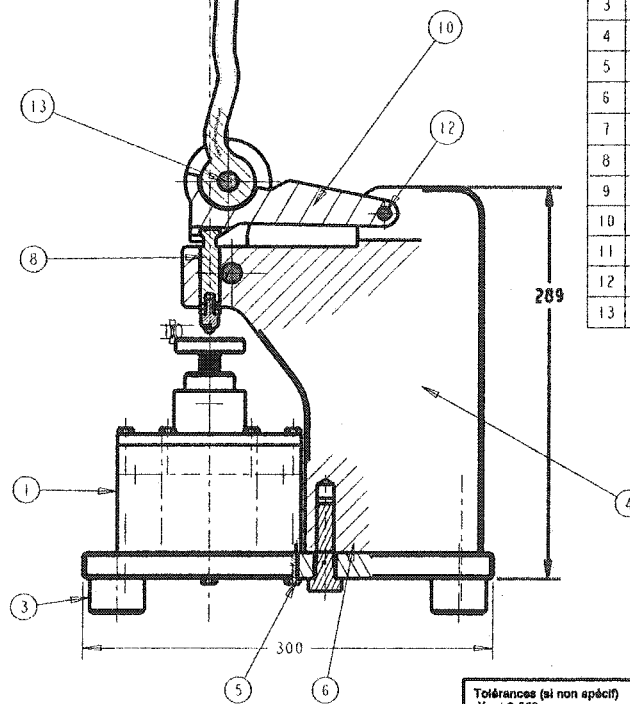
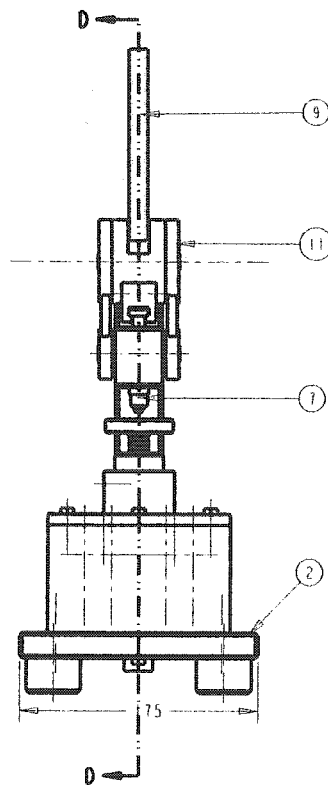


Université du Québec  
École de technologie supérieure  
Département de génie mécanique

L'information présente sur cette copie est confidentielle  
et demeure la propriété de l'École de technologie  
supérieure.  
Ne peut être reproduit en entier ou en partie sans  
l'autorisation écrite de l'École de technologie supérieure.

Dimensions en mm  Tolerances non spécifiées X : $\pm 1$ .X : $\pm 0.5$ .XX : $\pm 0.1$ Ang : $\pm 1^\circ$	Projet	R0035		
	Drawing	CAGE FIXE		A
	Model	R0035-1		ASSEM
	Dessinateur			Scale : 0.250
Sheet 1 of 1	QTY	1	MTL	ASSEMBLAGE 05 June 2003





SECTION D-D  
ECHELLE 0.350

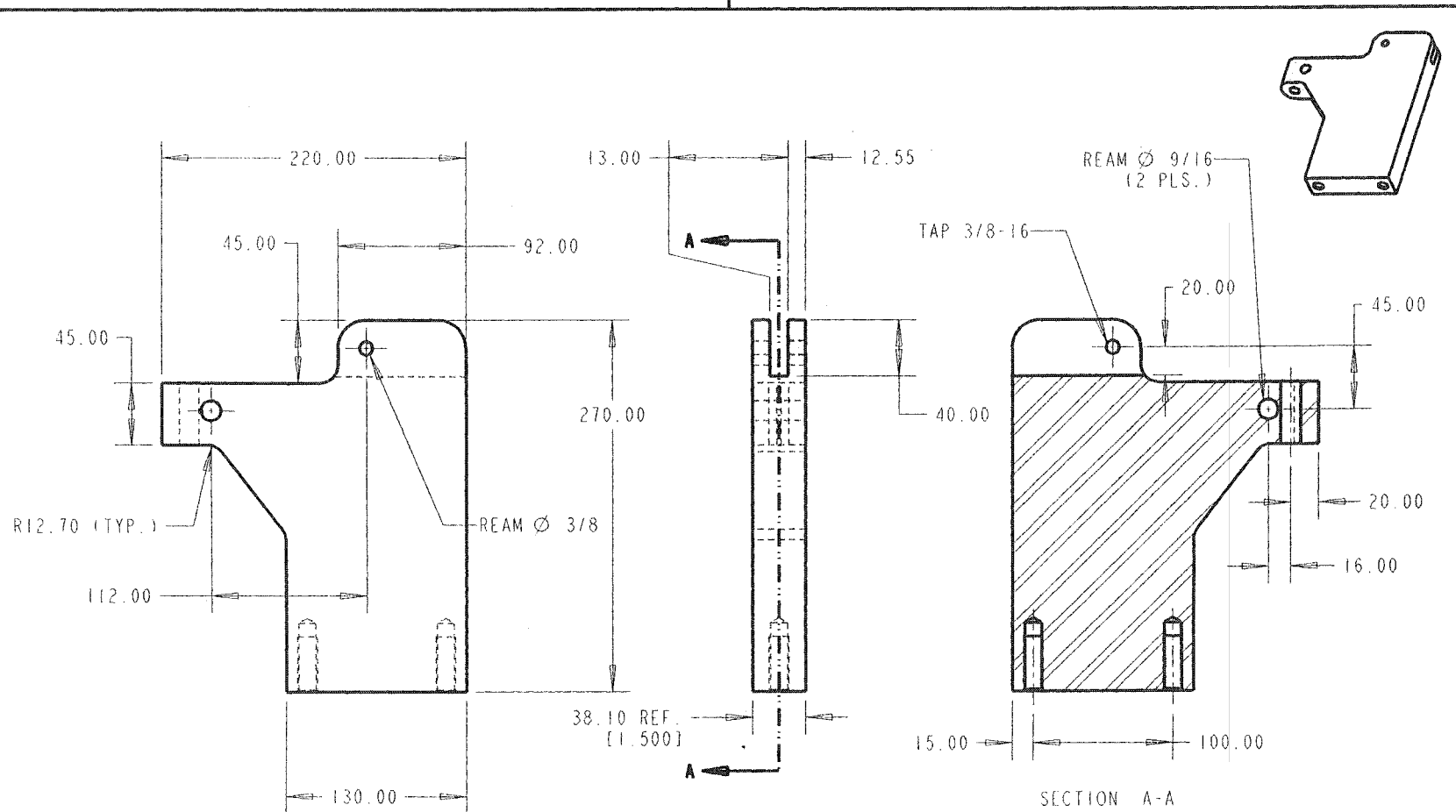
N°	DESIGNATION	MATERIAU	QTE
1	LIMITEUR DE FORCE	AISI 1040	1
2	SEMELE	AISI 1040	1
3	PIED DE L'APPAREIL	AISI 1040	4
4	CORPS	AISI 1040	1
5	VIS 1/4"-28	AISI 1040	4
6	VIS 9/16"-12	AISI 1040	2
7	INDENTEUR Ø 1/8"	AISI 1040	1
8	PORTE-BILLE	AISI 1040	1
9	LEVIER APPLICATION DE CHARGE	AISI 1040	1
10	PIECE DE POINCONNEUSE 1	AISI 1040	1
11	PIECE DE POINCONNEUSE 2	AISI 1040	2
12	AXE 1	AISI 1040	1
13	AXE 2	AISI 1040	2


Tolérances (si non spécif)  
.X : ±0.083  
.XX : ±0.010  
.XXX : ±0.005  
Frac : ±1/64  
Ang : ±1°

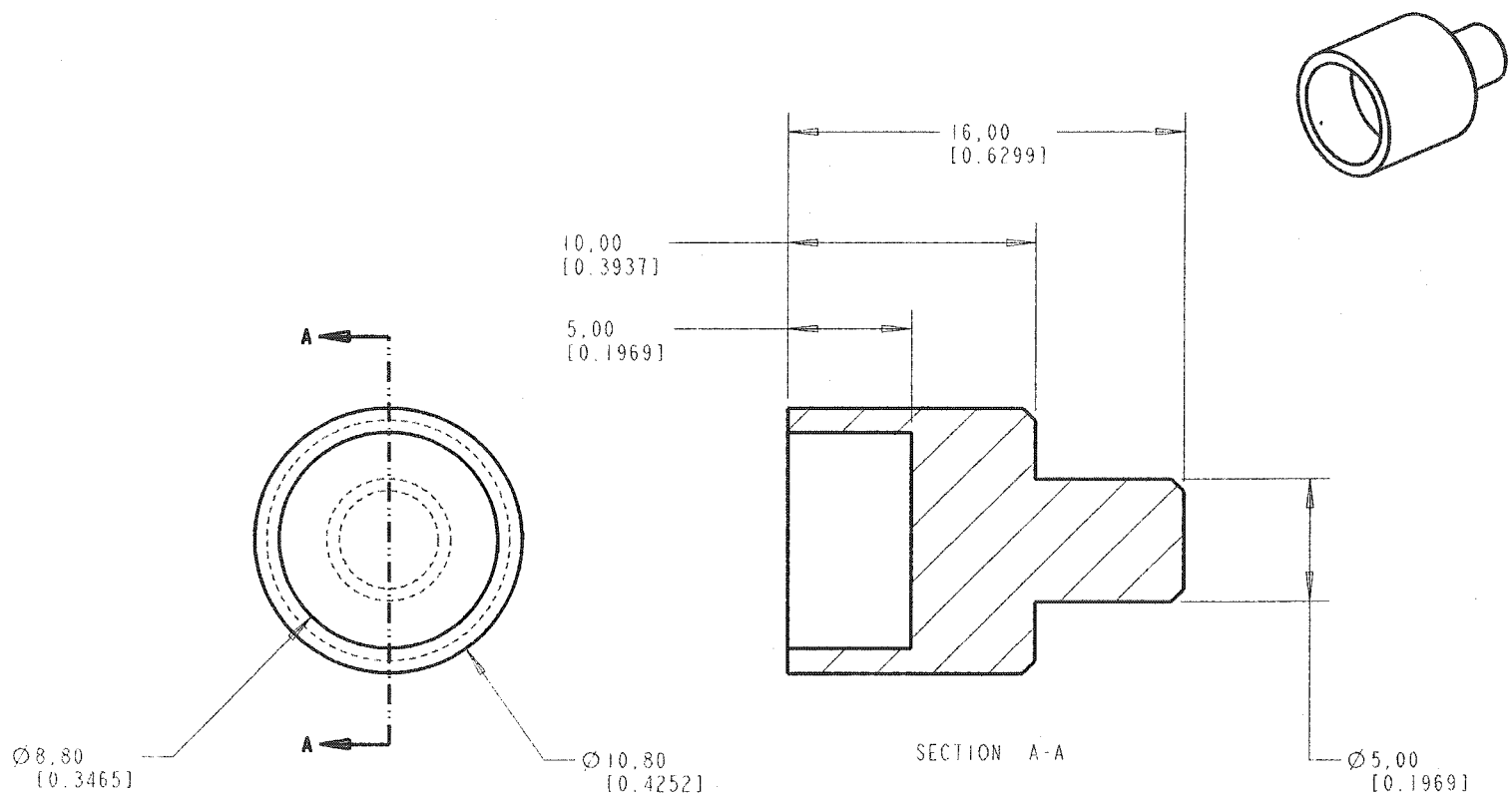
Université du Québec  
École de technologie supérieure  
Département de génie mécanique  
Projet R0035  
Dessin APPAREIL GLOBAL


L'Université publie ces notes sous sa responsabilité  
et s'engage à garantir la qualité de son service  
client.

Sheet 1 of 1	MTL	Dessinateur	M. DRIIRA	B
Echelle 0.350	QTE 1	ACIER	28-Mar-03	



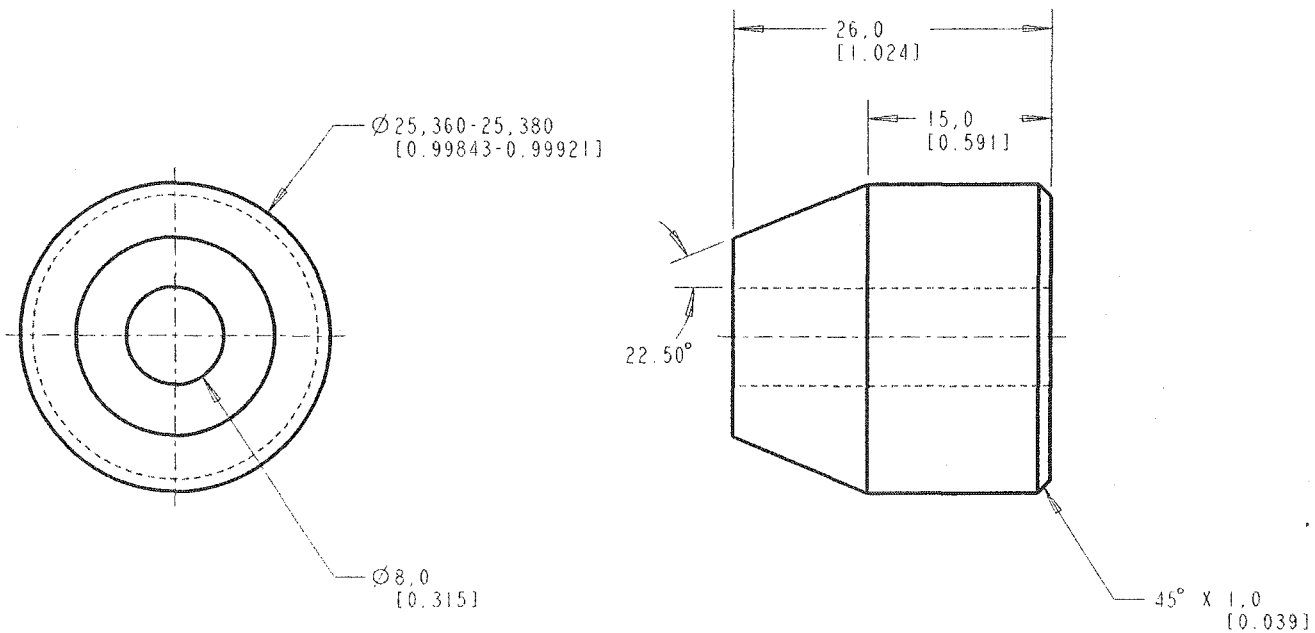
 Université du Québec École de technologie supérieure Département de génie mécanique			L'information présente sur cette copie est confidentielle et demeure la propriété de l'École de technologie supérieure. Ne peut être reproduit en entier ou en partie sans l'autorisation écrite de l'École de technologie supérieure.			
Dimensions en mm		Projet	R0035			
Tolerances non spécifiées		Drawing	CORPS			A
X : ±1		Model	R0035-5			PART
.X : ±0.5		Dessinateur	M. DRIRA			Scale : 0.250
.XX : ±0.1						
Ang : ±1°						
Sheet 1 of 1		QTY	01	MTL	AISI 4140	21-May-03




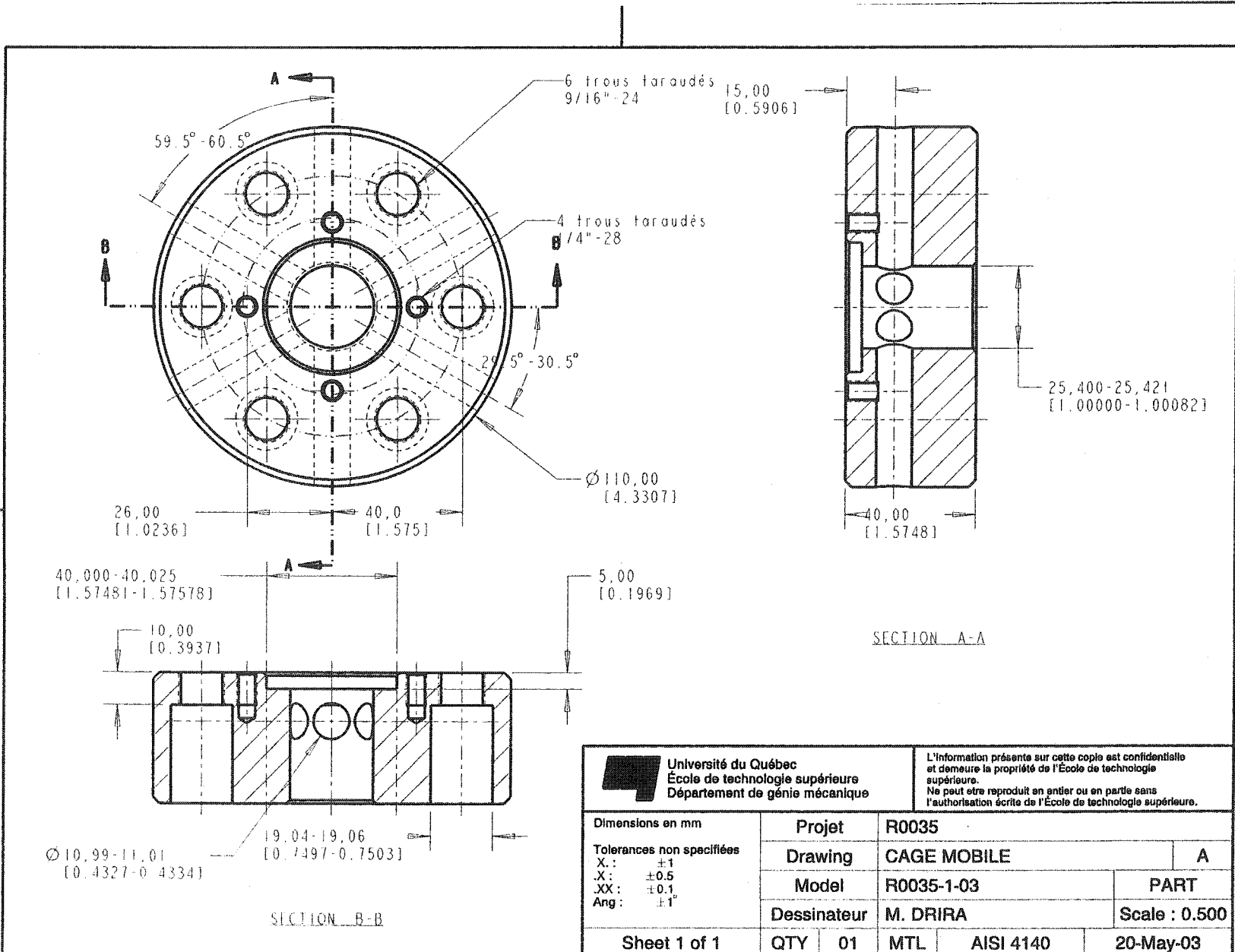
 <b>Université du Québec</b> <b>École de technologie supérieure</b> <b>Département de génie mécanique</b>		L'information présente sur cette copie est confidentielle et demeure la propriété de l'École de technologie supérieure. Ne peut être reproduit en entier ou en partie sans l'autorisation écrite de l'École de technologie supérieure.			
Dimensions en mm Tolerances non spécifiées X : ±1 XX : ±0.5 XXX : ±0.1 Ang : ±1°		Projet	R0035		
		Drawing	ADAPTEUR BILLE RESSORT		A
		Model	R0035-2-01		PART
		Dessinateur	M. DRIRA		Scale : 4.00X
Sheet 1 of 1		QTY	06	MTL	AISI 4140 21-May-03




Dimensions en mm  Tolerances non spécifiées X :     ±1 X :     ±0.5 XX :   ±0.1 Ang :   ±1°	Projet		R0035				
	Drawing		BAGUE DE GUIDAGE				A
	Model		R0035-1-05			PART	
	Dessinateur		M. DRIRA			Scale : 1.000	
	Sheet 1 of 1		QTY	01	MTL	AISI4140	20-May-03



 <b>Université du Québec</b> <b>École de technologie supérieure</b> <b>Département de génie mécanique</b>		L'information présente sur cette copie est confidentielle et demeure la propriété de l'École de technologie supérieure. Ne peut être reproduit en entier ou en partie sans l'autorisation écrite de l'École de technologie supérieure.			
Dimensions en mm Tolerances non spécifiées X : $\pm 1$ .X : $\pm 0,5$ .XX : $\pm 0,1$ Ang : $\pm 1^\circ$	Projet	R0035			
	Drawing	CONE DE REGLAGE			A
	Model	R0035-1-04		PART	
	Dessinateur	M. DRIRA		Scale : 2.000	
Sheet 1 of 1	QTY	01	MTL	AISI 4140	21-May-03



 <b>Université du Québec</b> École de technologie supérieure Département de génie mécanique		L'information présente sur cette copie est confidentielle et demeure la propriété de l'École de technologie supérieure. Ne peut être reproduit en entier ou en partie sans l'autorisation écrite de l'École de technologie supérieure.		
Dimensions en mm Tolérances non spécifiées X: $\pm 1$ X: $\pm 0,5$ XX: $\pm 0,1$ Ang: $\pm 1^\circ$	Projet	R0035		
	Drawing	CAGE MOBILE		
	Model	R0035-1-03		PART
	Dessinateur	M. DRIRA		Scale : 0.500
Sheet 1 of 1	QTY	01	MTL	AISI 4140
				20-May-03

Ø 1.417-1.417  
[1.41733-1.41736]

Ø 0.6  
[0.630]

Ø 2.05  
[2.0472]

Ø 0.25  
[0.2500]

Ø 0.38  
[0.3750]

Ø 5.28  
[5.2756]

1.26  
[1.2598]

0.31  
[0.3150]

0.16  
[0.1575]

1.57  
[1.5748]

0.2  
[0.157]

3.82  
[3.8189]  
4.354-4.354  
[4.35434-4.35435]

SECTION B-B

FILET M6 X 1

0.9  
[0.866]

SECTION A-A



Université du Québec  
École de technologie supérieure  
Département de génie mécanique

L'information présente sur cette copie est confidentielle  
et demeure la propriété de l'École de technologie  
supérieure.  
Ne peut être reproduit en entier ou en partie sans  
l'autorisation écrite de l'École de technologie supérieure.

Dimensions en mm

Tolerances non spécifiées

X: ±1

.X: ±0.5

.XX: ±0.1

Ang: ±1°

Projet

R0035

Drawing

COUVERCLE DU HAUT

A

Model

R0035-1-02

PART

Dessinateur

M. DRIRA

Scale : 0.333

Sheet 1 of 1

QTY

01

MTL

AISI 4140

20-May-03

Ø 110.62  
110.60

FILET 1/4-20 X 15 MM  
6 TROUS EQUIDISTANTS  
SUR UN CERCLE DE Ø122MM

TAP 1/4-20 X 10 MM  
(6 PLS.)

Ø 50.00

Ø 134.00

22.00

12.00

86.0°

79.00

SECTION A-A



Université du Québec  
École de technologie supérieure  
Département de génie mécanique

L'information présente sur cette copie est confidentielle  
et demeure la propriété de l'École de technologie  
supérieure.  
Ne peut être reproduit en entier ou en partie sans  
l'autorisation écrite de l'École de technologie supérieure.

Dimensions en mm

Tolerances non spécifiées

X: ±1

.X: ±0.5

.XX: ±0.1

Ang: ±1°

Projet

R0035

Drawing

CAGE FIXE

A

Model

R0035-1-01

PART

Dessinateur

M. DRIRA

Scale : 0.333

Sheet 1 of 1

QTY

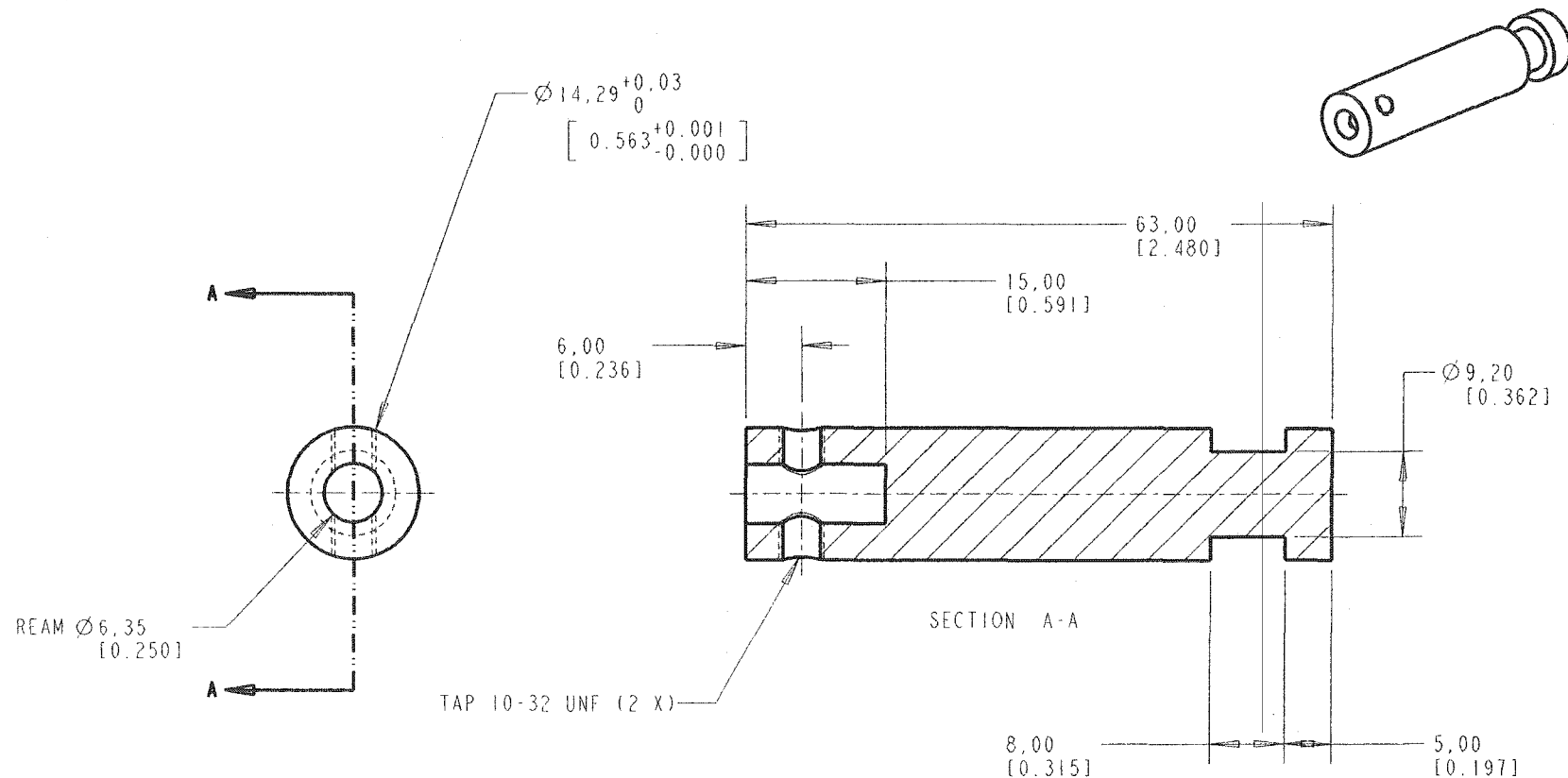
01


MTL

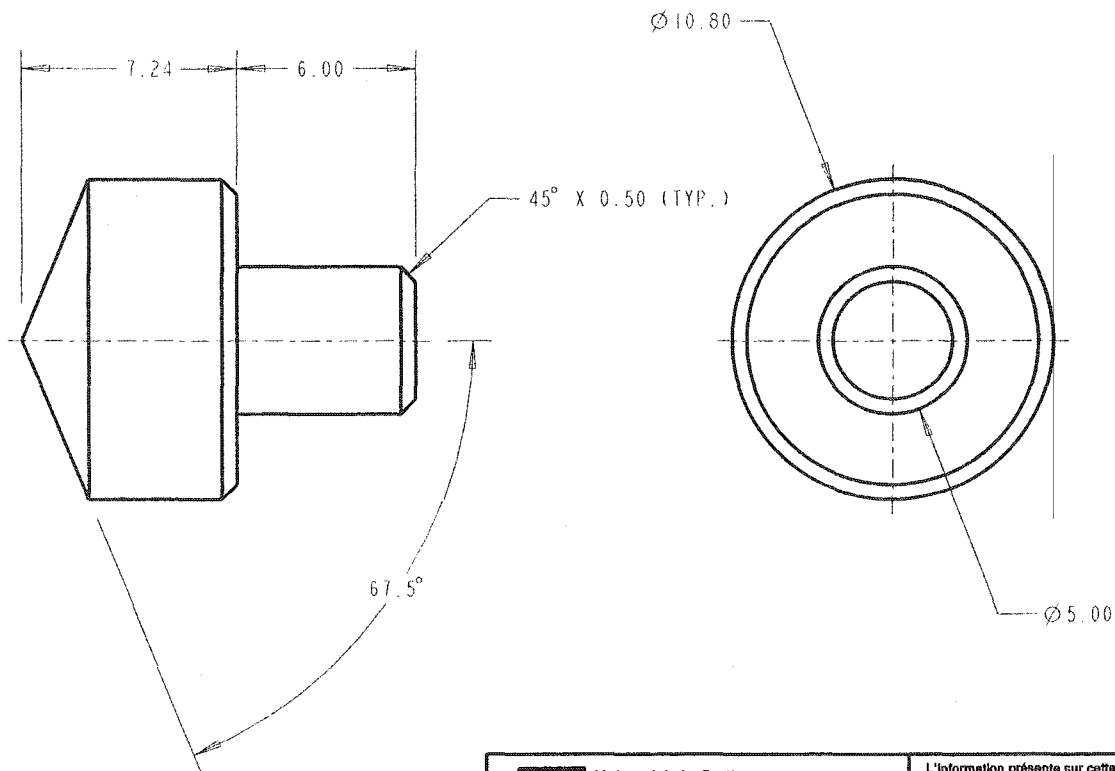
AISI 4140


20-May-03

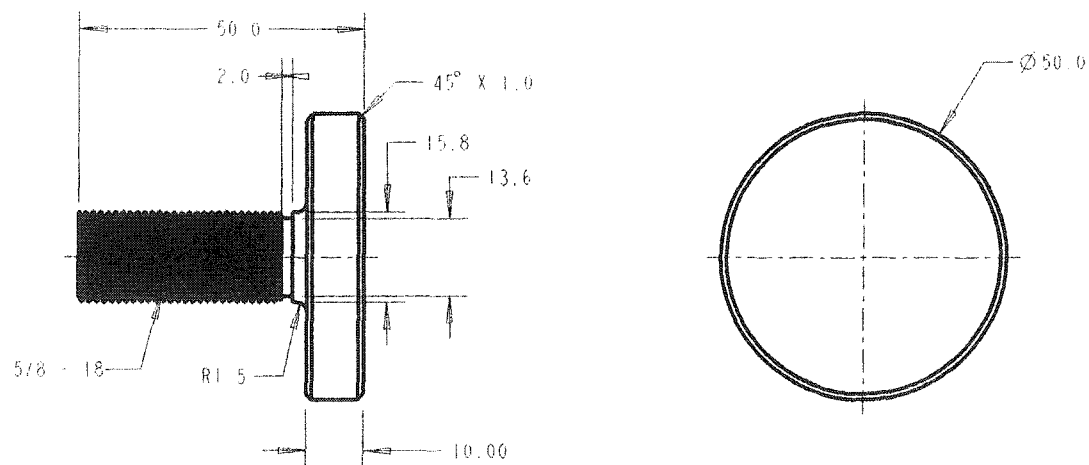





 <b>Université du Québec</b> École de technologie supérieure Département de génie mécanique		L'information présente sur cette copie est confidentielle et demeure la propriété de l'École de technologie supérieure. Ne peut être reproduit en entier ou en partie sans l'autorisation écrite de l'École de technologie supérieure.		
Dimensions en mm Tolerances non spécifiées X: $\pm 1$ .X: $\pm 0.5$ .XX: $\pm 0.1$ Ang: $\pm 1^\circ$	Projet	R0035		
	Drawing	PORTE INDENTEUR		A
	Model	R0035-6		PART
	Dessinateur	M. DRIRA		Scale : 1.500
	Sheet 1 of 1	QTY	01	MTL AISI 4140 20-May-03



				Université du Québec École de technologie supérieure Département de génie mécanique				L'information présente sur cette copie est confidentielle et demeure la propriété de l'École de technologie supérieure. Ne peut être reproduit en entier ou en partie sans l'autorisation écrite de l'École de technologie supérieure.			
Dimensions en mm  Tolerances non spécifiées X :     ± 1 .X :    ± 0.5 .XX :   ± 0.1 Ang :   ± 1°				Projet		R0035					
				Drawing		ADAPTEUR CONE RESSORT				A	
				Model		R0035-2-02				PART	
				Dessinateur		M. DRIRA				Scale : 5.000	
				Sheet 1 of 1		QTY	06	MTL	AISI 4140		21-May-03



SCALE : 1.000

 <b>Université du Québec</b> <b>École de technologie supérieure</b> <b>Département de génie mécanique</b>		L'information présente sur cette copie est confidentielle et demeure la propriété de l'École de technologie supérieure. Ne peut être reproduit en entier ou en partie sans l'autorisation écrite de l'École de technologie supérieure.		
<b>Dimensions en mm</b> Tolérances non spécifiées X : ±1 .X : ±0.5 .XX : ±0.1 Ang : ±1°		<b>Projet</b> R0035		
		<b>Drawing</b> PORTE PIERCE		A
		<b>Model</b> VISPORTEPIECES		PART
		<b>Dessinateur</b> M. DRIRA		Scale : 1.000
Sheet 1 of 1		QTY	01	MTL
		AISI 4140		21-May-03

## BIBLIOGRAPHIE

Bailey, John A. et al. (2000) ASM Handbook, Volume 8, Mechanical Testing and Evaluation, Materials Park, OH 44073-0002, [www.asminternational.org](http://www.asminternational.org)

Brandes, E., Brook, G. B., Smithells, C. J. (1992) Smithells metals references handbook 7ième Edition P. 21.1 et 21.2.

Datsko, J., L. Hartwig, and B. McClory (2001) « On the Tensile Strength and Hardness Relation for Metals » Journal of Materials Engineering and Performance, V 10(6), pp 718-722.

Faure, Louis (1991) Techniques de l'Ingénieur : Liaison par obstacle – Éléments de théorie des coins, B5520 – 3 a 5 : Volume : BAD.

FRANÇOIS, Dominique (1984) Techniques de l'Ingénieur : Essais Mécaniques des Métaux - Essai de dureté : Tome M1II – M123.

Guillot, Jean (1987) Techniques de l'Ingénieur : Assemblage par éléments filetés - Calcul B5560 – 6,7 : Volume : BAD.

Lamarche, Louis (2001) Notes de cours : Système de mesures, Chapitre 6 : Analyse de données – Erreur expérimentale P. 143 - 159.

MONTHEILLET, Frank (1996) Techniques de l'Ingénieur : Métallurgie en mise en forme - Matériaux Métalliques : Tome M1II – M600.

Nayebi, A., R. El Abdi, O. Bartier, G. Mauvoisin (2002) « New procedure to determine steel mechanical parameters from the spherical indentation technique » Mechanics of Materials V 34, pp 243-254.

Oberg, E. et al. (1998) Machinery's Handbook 26ième Edition, New York, N.Y.: Industrial Press.

Perez, José Philippe (1994) Optique géométrique et ondulatoire : Classes Préparatoires aux Grandes Ecoles, 4<sup>ième</sup> édition.

Rezakhanlou, R. (1993) « L'essai de dureté : un essai mécanique a part entière » Service Réacteurs Nucléaires et Echangeurs - Département Etudes des Matériaux, code : 93NB00026.

Sayed, Nassar (1998) Handbook of bolts and bolted joints, edition par John H. Bickford imprimé par MARCEL DEKKER, INC <http://www.dekker.com> , ISBN 0-8247-9977-1.

Schey, John A. (2000) Introduction to manufacturing processes, 3ième Edition, Boston, Mass. : McGraw-Hill.

Taljat, B., T. Zacharia, F. Kosel (1997) « New analytical procedure to determine stress-strain curve from spherical data ».

William D. Callister, Jr (1996) « Materials Sciences and Engineering Introduction ».